rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Über die Veränderung des direkten Sonnenlichtes beim Eintritt in die Laubkrone der Bäume und in die Laubmassen anderer Gewächse.

Photometrische Untersuchungen auf pflanzenphysiologischem Gebiete

(VI. Abhandlung)

von

Julius Wiesner,

w. M. k. Akad.

(Mit 11 Textfiguren.)

(Vorgelegt in der Sitzung am 13. Mai 1909.)

Einleitung.

Um eine klare Übersicht über die natürlichen Beleuchtungsverhältnisse der Gewächse zu gewinnen, ist es zweckmäßig, zwei Kategorien von Pflanzen zu unterscheiden: erstens solche, welche ihr Laub dem äußeren Lichte völlig darbieten, sich also selbst gar nicht beschatten, und zweitens solche, welche mit einem Teil ihres Laubes den anderen Teil beschatten. Als Beispiel der ersten Kategorie nenne ich die typisch ein- oder zweiblättrigen Gewächse oder die Pflanzen mit schwimmenden Blättern, deren obere mit der Luft in Berührung stehenden Seiten des gesamten äußeren Lichtes teilhaftig werden. Als Beispiel der zweiten Kategorie seien die Laub- und Nadelbäume angeführt.

Ich habe schon gelegentlich auf diese Unterschiede hingewiesen und »sich selbst beschattende Gewächse«, ferner »sich nicht selbst beschattende Gewächse« unterschieden.[1]

[1] Bemerkungen über Blattgestalt und Lichtgenuß. Diese Sitzungsberichte, Bd. 117 (1908).

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Da man aber Ausdrücke wünscht, welche international zu gebrauchen sind, so proponiere ich, im Bedarfsfalle erstere als autoskiastische, letztere als anautoskiastische Gewächse zu bezeichnen.[1]

Es ist begreiflich, daß die Beleuchtungsverhältnisse der Pflanzen dieser beiden Kategorien sehr verschieden sind. Die anautoskiastischen empfangen das ganze äußere Licht des Standortes und, wenn sie frei exponiert sind, das gesamte Tageslicht im Sinne von Bunsen und Roscoe. Die autoskiastischen Gewächse genießen nur in den äußeren Partien des Laubes die gleichen Lichtmengen wie die anautoskiastischen, aber das eigene Laub hemmt den Zutritt des Lichtes zu den tiefer situierten Blättern desto mehr, je weiter dieselben von den peripheren Blättern derselben Gewächse entfernt sind und selbstverständlich auch, je reicher die betreffenden Pflanzen belaubt sind.

Alle Gewächse empfangen durch die natürliche Tagesbeleuchtung zwei Arten des Lichtes, die nicht nur in rein physikalischer, sondern auch in physiologischer Beziehung zu unterscheiden sind: das diffuse, von unendlich vielen Seiten zustrahlende Tageslicht und das durch (nahezu) parallele Strahlung ausgezeichnete direkte Sonnenlicht. Vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang herrscht während der Dämmerung nur diffuses Tageslicht, desgleichen steht bei bedeckter Sonne die Pflanze ausschließlich unter der Wirkung des diffusen Lichtes. Bei unbedeckter Sonne herrscht, soweit die Atmosphäre reicht, ein gemischtes Licht, bestehend aus dem in der Atmosphäre zerstreuten (diffusen) Licht und dem direkten Sonnenlichte. Die Pflanze kann also zeitweilig unter dem alleinigen Einflusse des diffusen Lichtes stehen, nie ist sie aber in der Natur dem alleinigen Einflusse des direkten Sonnenlichtes unterworfen.

Wie ich schon vor langer Zeit gezeigt habe, ist das diffuse Licht für das Pflanzenleben im allgemeinen von größerer Bedeutung als das direkte Sonnenlicht, welches zumeist von der

[1] Nach dem Vorschlage meines geehrten Herrn Kollegen Professors P. Kretschmer. Ableitung von dem Worte αὐτοσκιάζω = sich selbst beschatten.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Pflanze mehr abgewehrt als aufgenommen wird. Nur in den arktischen und alpinen Gebieten spielt das direkte Sonnenlicht eine größere Rolle; auch bei der Entwicklung des Laubes der sommergrünen Holzgewächse greift das direkte Sonnenlicht fördernd ein.[1] Auch die Blütenbildung vieler Pflanzen wird durch das direkte Sonnenlicht gefördert,[2] desgleichen die ganze Entwicklung fast aller annuellen Gewächse.[3] Ja selbst in jenen Fällen, in welchen das den Pflanzen auf den natürlichen Standorten zufallende Lichtareal zu klein ist, um ihnen die genügende Lichtmenge darzubieten, kann auch bei kraut- und staudenartigen Gewächsen die Laubentwicklung durch direktes Sonnenlicht eine Förderung erfahren.

Nach den bisherigen Erfahrungen wirkt das Sonnenlicht, soweit es nicht schädigend in die Vegetationsprozesse eingreift,[4] bloß fördernd, nicht aber spezifisch.

Will man den Anteil, den das diffuse Tageslicht, und den, welchen das direkte Sonnenlicht auf die Pflanze ausübt, kennen lernen, so muß die Menge des ersteren und die des letzteren photometrisch bestimmt werden, wie ich dies mehrfach getan habe. Beobachtungen über den Einfluß des diffusen und des Sonnenlichtes auf Pflanzen an gleichen, aber photometrisch nicht bestimmten Standorten führen über die alten gärtnerischen Erfahrungen nicht hinaus, indem sie bloß lehren, was man lange weiß, daß manche Pflanzen an sonnigen, andere wieder mehr an schattigen Standorten gedeihen.

Die Verminderung der Lichtstärke beim Eindringen des Lichtes in die Laubmassen der Gewächse habe ich durch zahlreiche Messungen festgestellt: beruht ja auf der Kenntnis dieser Verminderung bei allen sich selbst beschattenden Gewächsen die Feststellung des Lichtgenusses, während bei den sich nicht

---

[1] Wiesner, Über den Einfluß des Sonnen- und des diffusen Tageslichtes auf die Laubentwicklung sommergrüner Holzgewächse. Diese Sitzungsberichte, Bd. 113 (1904).

[2] Wiesner, Compt. rend., 2, Mai 1898.

[3] Siehe hierüber mein unten zitiertes Werk über Lichtgenuß, p. 67, 71 und 256.

[4] Zum Beispiel beim Hitzelaubfall; siehe Wiesner, Berichte der Deutschen Bot. Gesellsch., Bd. XXII (1904).

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

beschattenden Gewächsen der Lichtgenuß ausschließlich von den Beleuchtungsverhältnissen des Standortes abhängig ist.

Bei Bestimmung des Lichtgenusses der Pflanzen wurde auf diffuses und gemischtes (aus diffusem Tages- und direktem Sonnenlicht bestehendes) Licht Rücksicht genommen.

In bezug auf das diffuse Tageslicht wurde die Verminderung seiner Stärke beim Eindringen in die Laubmasse der Gewächse in zahlreichen Fällen von mir festgestellt und ferner ermittelt, unter welchen Verhältnissen und bis zu welcher Grenze seine Stärke die spektrale Zusammensetzung derselben mit Rücksicht auf meine Methode — welche mit Fehlern behaftet ist, die bis 10% reichen können — als konstant angenommen werden kann.[1]

Über die Beleuchtung der Pflanze unter Mitwirkung des direkten Sonnenlichtes habe ich, abgesehen von den schon mitgeteilten diesbezüglichen Erfahrungen, nur noch auf die Schutzeinrichtungen baumartiger Gewächse gegen übermäßige Sonnenstrahlung, insbesondere auf großen Seehöhen,[2] hingewiesen und ferner gezeigt, wie die Blätter vieler Pflanzen durch ihre Form oder durch ihre Lage oder durch beides einen spezifischen physiologischen Charakter annehmen (»panphotometrische Blätter«), welcher sie befähigt, einen Teil des ihnen schädlichen Sonnenlichtes so weit abzuwehren, als sich dies mit ihrer Tendenz, möglichst viel diffuses Licht aufzunehmen, verträgt.[3]

Wie sich das direkte Sonnenlicht beim Eintritt in die Laubkronen der Bäume und überhaupt in die Laubmassen anderer blattreicher Gewächse verhält, habe ich in meinen bisher veröffentlichten Schriften über Lichtgenuß noch nicht eingehend erörtert, sondern legte bisher nur dar, daß das in breiten Zügen in die Laubmassen eindringende

---

[1] Siehe hierüber und über die natürliche Beleuchtung der Pflanzen mein Werk: »Der Lichtgenuß der Pflanzen«, Leipzig 1907. Im nachfolgenden wird dieses Werk kurz unter dem Schlagworte »Lichtgenuß« zitiert werden.

[2] Photometr. Unters. V. Über den Lichtgenuß der Pflanze im Yellowstonegebiete. Diese Sitzungsberichte, Bd. 114 (1905).

[3] »Lichtgenuß«, p. 73; ferner Wiesner, Anpassung des Laubblattes an die Lichtstärke. Biol. Zentralblatt (1899).

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

direkte Sonnenlicht nicht wie das unter gleichen Verhältnissen eindringende diffuse Licht eine Schwächung erfährt, sondern seine volle Intensität beibehält, wie tief es auch ungehindert in das Laub eindringen mag.[1] Ferner wurden von mir noch die durch das direkte Sonnenlicht beim Durchgang durch kleine, im Laube sich befindende Lücken entstehenden Sonnenbilder insoweit als Quelle der Beleuchtung der Pflanzen ins Auge gefaßt, als durch diese Sonnenbilder eine verstärkte Beleuchtung der vom Laube der Bäume beschatteten Bodenvegetation zustande kommt.[2]

In dieser Abhandlung handelt es sich nun darum, die Veränderungen des direkten Sonnenlichtes beim Eintritt in die Laubmassen möglichst genau darzulegen, und zwar auf Grund von im wesentlichen rein experimentell durchgeführten Untersuchungen. Es soll damit ein weiterer Beitrag zur Kenntnis der natürlichen Beleuchtungsverhältnisse der Pflanze gegeben werden.

I. Auftreten von Sonnenbildern im Schatten der Gewächse.

Seit alter Zeit kennt man die am Boden im Schatten der von der Sonne beleuchteten Bäume auftretenden kreisförmigen oder elliptischen Flecken, die man heute mit Recht als Sonnenbilder bezeichnet. Schriftliche Nachrichten über solche Sonnenbilder lassen sich bis auf Aristoteles zurückverfolgen.[3] Er kannte ihre wahre Natur nicht, wußte aber, daß sie durch die Sonne bewirkt werden und sich wohl unterscheiden von jenen hellen Lücken im Baumschatten, welche vom Schatten der einzelnen Blätter begrenzt sind.

Man beachtete bisher nur die am beschatteten Boden auftretenden Sonnenbilder und ich habe dieselben früher auch nur insofern in Betracht gezogen, als sie für die Bodenvegetation

[1] »Lichtgenuß«, p. 211.

[2] »Lichtgenuß«, p. 36 und 167.

[3] Siehe das Kapitel »Die historische Entwicklung der Botanik« in meiner Biologie der Pflanzen, 1. Aufl. (1889), p. 262 und 263.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

von Vorteil sind. Aber diese am beschatteten Boden erscheinenden Sonnenbilder sind doch nur ein Rest und in der Regel nur ein kleiner Rest der durch die im Laube sich befindenden Lücken entstehenden Sonnenbilder. Die Hauptmasse derselben projiziert sich gewöhnlich auf die Blätter der Laubkrone und kommt durch Verstärkung der Beleuchtung diesen zugute.

Im Schatten, welchen Zypressen bei Sonnenbeleuchtung auf den Boden werfen, sucht man in der Regel Sonnenbilder vergebens. Hin und wieder erscheint im Schatten einer oder der anderen Zypresse ein Sonnenbild oder es erscheinen hin und wieder einige wenige solche Bilder. Wenn man aber in die Tiefe der Krone dieses Baumes einen weißen Karton so einführt, daß die Sonnenstrahlen etwa senkrecht auf die weiße Fläche fallen, so sieht man zahlreiche solche Sonnenbilder in Form kleiner Kreise. 30 bis 40 *cm* von der Peripherie der Krone entfernt, erscheinen diese Sonnenbildchen mit einem Durchmesser von 3 bis 4 *mm*. Bei Sonnenbeleuchtung entstehen diese Bildchen in der Krone der Zypressen sehr zahlreich, fallen auf die Blattorgane und verstärken, wie schon der Augenschein lehrt, deren Beleuchtung.

Die Zypresse ist also ein Baum, der bei Sonnenbeleuchtung viele Tausende von Sonnenbildchen erzeugt, die dem Laube beim Assimilationsgeschäfte zugute kommen, während am Boden, auf welchem der Baum steht, kein in der Laubkrone entstehendes Sonnenbild sichtbar wird oder nur sehr vereinzelt in Erscheinung tritt.

Ein noch besseres Beispiel eines Baumes, der die erzeugten Sonnenbilder im Laube verschwinden läßt, ist *Gleditschia triacanthos*. Soviel ich gesehen habe, findet sich im Schatten dieses Baumes am Boden kein einziges Sonnenbild. Die im Laube dieses Baumes sich vorfindenden Lücken erzeugen aber, wie man sich leicht überzeugen kann, zahllose Sonnenbilder, die sich auf die Laubblättchen projizieren, diesen zugute kommen, aber in größerer Entfernung von der Erzeugungsstätte sehr lichtschwach werden, so daß sie am Boden nicht mehr zu erkennen sind.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Es gibt also Baumarten, welche auf dem Boden, auf welchem sie stehen, gar keine Sonnenbilder erscheinen lassen, aber doch zahllose Sonnenbilder erzeugen, welche innerhalb der Laubkrone zur Verstärkung der Beleuchtung der Blätter dienen.

Man kann es wohl als Regel aussprechen, daß Laub- und Nadelbäume, desgleichen die Straucharten Sonnenbilder erzeugen. Nur ausnahmsweise, z. B. wenn die Blätter sehr klein sind oder angedrückt an den Zweigen stehen, fehlen die Bedingungen der Bildung von Sonnenbildern.

Aber die Eigenschaft, Sonnenbilder zu erzeugen, ist nicht auf die Holzgewächse beschränkt. Insbesondere kleine und zugleich reichblättrige krautartige oder staudenartige Gewächse erzeugen reichlich Sonnenbilder. Man kann sich davon leicht, z. B. an Selaginellen, überzeugen. Läßt man Sonnenlicht auf einen nicht zu kleinen Stock von *Selaginella cuspidata* fallen und fängt man den entstehenden Schatten in einer Entfernung von 20 bis 30 *cm*, von der Peripherie des Laubes aus gemessen, auf, so werden in diesem Schatten zahllose Sonnenbildchen erkennbar, welche sich desto mehr der Kreisform nähern, je mehr die Sonnenstrahlen der senkrechten Lage sich nähern. Der Durchmesser dieser Sonnenbilder beträgt beiläufig 2 bis 3 *mm*.

Man kann also sagen, daß nicht nur Laub- und Nadelbäume, desgleichen Sträucher, sondern selbst kraut- und staudenartige Gewächse befähigt sind, durch die in ihrem Laube befindlichen Lücken Sonnenbilder zu erzeugen, die sich entweder auf die Blätter projizieren oder zum Teil auch auf dem Boden erscheinen, auf welchem diese Gewächse stehen.

In allen Fällen kommt das diese Sonnenbilder erzeugende Licht dem Laube der betreffenden Pflanzen, im letzten Falle auch der beschatteten Bodenvegetation zugute.

Aus den später folgenden Auseinandersetzungen wird klar werden, bei welchen Gewächsen Sonnenbilder entstehen können und bei welchen diese Bilder ausgeschlossen sind.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

II. Zustandekommen der Sonnenbilder.

Es ist schon oben gesagt worden, daß die im Schatten der von der Sonne beleuchteten Gewächse entstehenden hellen, kreis- oder ellipsenförmig begrenzten hellen Flecke, die nunmehr als Sonnenbilder bekannt sind, schon im Altertum gesehen wurden und daß sich die schriftlichen Aufzeichnungen hierüber bis auf Aristoteles zurückverfolgen lassen.

Ihr Wesen blieb dem Stagiriten fremd, obwohl er wußte, daß sie durch die Sonne hervorgebracht werden; er war sich auch darüber völlig klar, daß sie durch die Sonne in einer ganz anderen Weise hervorgebracht werden müssen als die von den scharfen Schatten der Blätter begrenzten hellen Flecke der Baumschatten. Ihre wahre Natur erkannte er also nicht, sondern legte sich zur Erklärung der Erscheinung eine Hypothese zurecht. Er schrieb nämlich dem Sonnenlicht eine besondere Fähigkeit (Zirkularnatur) zu, durch welche die Sonnenstrahlen beim Eindringen in kleine Lücken im Laube helle Kreise oder Ellipsen hervorzubringen imstande wären.

Das faktische Zustandekommen der Sonnenbilder konnte erst aufgeklärt werden, nachdem man die sogenannte Lochkamera, die einfachste Form der *Camera obscura*, erfunden und begriffen hatte. Da die Lochkamera von jedem genügend beleuchteten Körper jenseits des Loches bei genügender Beschattung oder gar Abhaltung des seitlichen Lichtes (umgekehrte) Bilder dieses Körpers gibt, indem die von dem beleuchteten Körper ausgehenden Strahlen sich im Mittelpunkte des Loches der Kamera schneiden, so ist es ganz selbstverständlich, daß die Sonnenstrahlen, wenn sie durch kleine Löcher hindurchgehen, ein Bild der Sonne geben müssen. Es ist bekannt, daß man zur Zeit, als das Prinzip der Lochkamera klargeworden war, sich desselben in der primitivsten Weise bediente, um Sonnenfinsternisse zu beobachten.

Es ist nunmehr ganz klar, daß die Sonnenbilder, also auch die im Laube der Bäume entstehenden, bei senkrechtem Einfalle der Sonnenstrahlen kreisförmig und bei schiefem Lichteinfall elliptisch ausfallen müssen und daß der kleine Durchmesser der Ellipse genau dieselbe Größe besitzt wie

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

der Durchmesser des an derselben Stelle entstehenden kreisförmigen Sonnenbildes.[1]

III. Entstehung und Größe des Sonnenbildes bei punktförmiger Öffnung der Lochkamera.

Gehen die Sonnenstrahlen im Laube oder sonstwo durch ein punktförmiges Loch hindurch, so ergeben sich sehr einfache Beziehungen zwischen der Größe des Durchmessers der Sonnenbilder und der Entfernung vom Loch der Lochkamera. Der scheinbare Sonnendurchmesser erscheint uns als Sehne eines Bogens von etwa einem halben Grad und bei der Kleinheit des Winkels kann der Bogen für die Sehne gesetzt werden. Der Durchmesser des Sonnenbildes (D) ist gleich der Entfernung (E) des Bildes vom punktförmigen Loche, multipliziert mit einer Konstanten, die sehr leicht zu berechnen ist.

$$D = \frac{2.E.\pi}{675} = E \times 0{\cdot}0093087,$$

wenn man annimmt, daß die Randstrahlen der Sonne sich unter einem Winkel von 32′ schneiden.

Der Durchmesser des Sonnenbildes ist hierbei selbstverständlich etwas größer, als der Wirklichkeit entspricht, nämlich als Bogen ausgedrückt. Rechnet man die Sehne

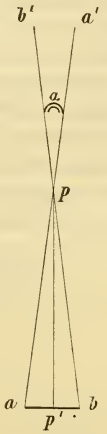


Fig. 1.
Schema für die Entstehung der Sonnenbilder bei punktförmiger Lochkamera.

$a\,a'$, $b\,b'$ Randstrahlen der Sonne, welche sich unter dem Winkel α (in Wirklichkeit $\doteq 32'$) schneiden. $a\,b$ Durchmesser des Sonnenbildes (im Texte mit D bezeichnet) in der Entfernung $p\,p'$ (im Texte mit E bezeichnet).

[1] Gewöhnlich wird Porta als Erfinder der *Camera obscura* bezeichnet. Er beschrieb 1558 die gewöhnliche Lochkamera und 1589 eine Camera obscura mit Linse. Aber schon Leonardo da Vinci (1452 bis 1519) beschreibt in seinem berühmten Manuskript *Codex atlanticus*, welches von der Accademia dei Lincei unter dem Titel »Il codice atlantico«, Mailand 1891, herausgegeben wurde, das Entstehen umgekehrter Bilder von beleuchteten Gegenständen, deren

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

dieses Bogens, also den Durchmesser des Sonnenbildes, so erhält man die Konstante 0·0093046.

Es ist aber noch zu erwähnen, daß die Größe des scheinbaren Sonnendurchmessers im Laufe des Jahres schwankt, nämlich im Winter sein Maximum, im Sommer sein Minimum erreicht. Das Maximum des scheinbaren Sonnendurchmessers entspricht einem Bogen von 32′ 32″ (Ende Dezember und anfangs Jänner), das Minimum einem Bogen von 31′ 28″. Die Konstante beträgt für das Maximum rund 0·00946, für das Minimum 0·00915.

Für unsere Zwecke genügt es vollständig, wenn man die Konstante 0·0093 wählt, welche einem Mittelwerte für die wahrscheinliche Beobachtungszeit auch sehr nahe kommt.[1]

Nach dieser Berechnungsweise ergeben sich folgende Werte für die Durchmesser der Sonnenbilder bei punktförmiger Öffnung der Lochkamera:

Entfernung in Zentimetern vom Loch der Kamera	Durchmesser in Millimetern
5	0·46
10	0·93
20	1·86
50	4·65
100	9·30
200	18·60
usw.	usw.

Strahlen »durch ein kleines Löchelchen hindurchgehen«. Er hat auch das menschliche Auge als Dunkelkammer aufgefaßt und hat dementsprechend die auf der Netzhaut entstehenden umgekehrten Bilder außen liegender Gegenstände richtig gedeutet. Kurzum, er kannte bereits sehr genau die Camera obscura und nannte sie »Camera optica«. Siehe auch Wilde, Geschichte der Optik, Berlin, Bd. I (1838). Vgl. auch J. M. Eder, Geschichte der Photographie, Halle (1905).

[1] In den einzelnen Ephemeriden herrscht bezüglich des scheinbaren Sonnendurchmessers keine vollkommene Übereinstimmung. Im Berliner Jahrbuch wird der (mittlere) Sonnenhalbmesser nach Auwers = 15′ 59″63, im Nautical Almanac = 16′ 1″82 gesetzt. Ich verdanke diese und die obigen Daten über den Wechsel des scheinbaren Sonnendurchmessers während des Jahres meinem verehrten Freunde, Herrn Hofrat E. Weiß, em. Direktor der k. k. Universitätssternwarte in Wien.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

IV. Entstehung und Größe der Sonnenbilder bei weiter Öffnung der Lochkamera.

Dieser Fall ist für die nachfolgenden Betrachtungen von besonderer Wichtigkeit, denn, wie ich später genauer auseinanderzusetzen haben werde, sind die im Laube vorhandenen Öffnungen, durch welche die Sonnenbilder zustande kommen, in der Regel groß, nämlich nichts weniger als punktförmig.

Wenn die Sonnenbilder durch größere Löcher, welche mehrere Millimeter oder sogar Zentimeter weit sind, gebildet werden, so steht der Durchmesser des Sonnenbildes nicht in dem einfachen Verhältnis zur Entfernung vom Loch der Kamera bis zur Bildfläche wie bei punktförmiger Öffnung. Doch ist auch hier eine gesetzmäßige Relation zwischen dem Durchmesser des Sonnenbildes und der Entfernung desselben von dem Loch der Lochkamera vorhanden.

Die Beobachtungen, welche ich über das Verhältnis des Durchmessers der Sonnenbilder zur Entfernung, die zwischen dem Loch der Lochkamera und dem Sonnenbilde besteht, bei bestimmter Größe des Loches angestellt habe, lassen sich auf das nachstehende Schema zurückführen (Fig. 2).

In der nachstehenden Figur bedeutet FF' die Bildfläche, auf welcher ein Sonnenbild sich projiziert, das entsteht, wenn das Loch der Lochkamera den Durchmesser ww' besitzt. In unserem Schema sind außer dem vom Zentrum der Sonnenscheibe kommenden Strahl AB jene Strahlen gezeichnet, welche vom Sonnenrand ausgehen und das Loch ww' tangieren. Diese Strahlen schließen den Winkel α ein, welcher, wie wir gesehen haben, mit $32'$ genügend genau beziffert ist, und schneiden sich in den Punkten z' und z''.

Die Randstrahlen der Sonne schneiden sich aber auch im Punkte z, genau in der Mitte von ww'. Diese Strahlen begrenzen also hier ein Sonnenbild, welches gewissermaßen durch ein punktförmiges Loch auf der Bildfläche FF' zustande kommt und welches den Durchmesser $a'b'$ aufweist. $a'b'$ ist nach dem Vorhergegangenen $= zB \times 0 \cdot 0093$.

Das Sonnenbild, welches aber beim Durchgange der Sonnenstrahlen durch die Öffnung ww' entsteht, ist größer

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

als $a'b'$; es hat den Durchmesser ab. Es hat dieselbe Größe, als wenn es durch eine Kamera mit punktförmigem Loch in z' entworfen worden wäre; es entsteht in einer Entfernung,

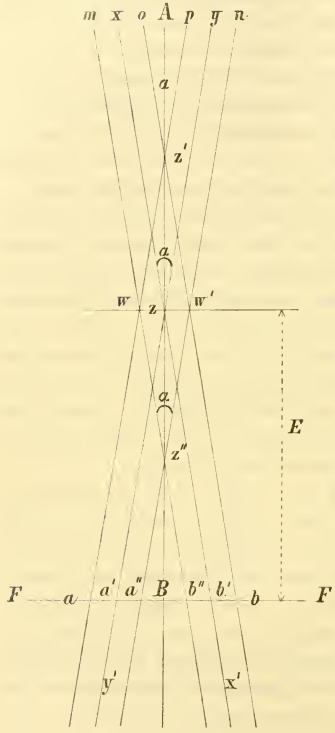


Fig. 2.

Gang der Sonnenstrahlen bei Anwendung einer Lochkamera mit der Öffnung ww'. Die Randstrahlen der Sonne xx', yy'; mb'' na''; pa, ob schneiden sich unter einem Winkel $\alpha = 32'$. Der Deutlichkeit halber wurde der Winkel α in der Figur größer angenommen. AB senkrecht auf die Bildfläche FF', durch die Mitte von $ww'(z)$ gehender Strahl.

ab, $a'b'$, $a''b''$ Sonnenbilder, welche ihren Scheitelpunkt in z', z und z'' haben. $a''b''$ heller Innenkreis, umgeben von den dunklen Säumen aa' bb' und $a'a''$ $b''b'$.

E Entfernung des Sonnenbildes $a'b'$ vom Mittelpunkte der Öffnung (z).

welche um zz' größer ist als das Sonnenbild, welches beim Durchgange durch z entstanden ist.

Während nun das durch eine Kamera mit punktförmigem Loch entstandene Bild gleichmäßig hell ist, erscheint ein von einem weiten Loch entworfenes Sonnenbild von einem dunkleren Saum umgeben. Der helle Innenkreis erscheint in derselben

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Größe, als wäre er von einer Kamera mit punktförmigem Loch entworfen. Und dieses punktförmige Loch (z'') liegt von dem Punkte z genau so weit ab, als der früher genannte Punkt z' von z abliegt. Es ist $zz'' = zz'$.

Wie also zu ersehen ist, ist das Sonnenbild, welches durch die Lücke ww' entstanden ist, von einem (dunkleren) Saum umgeben, welcher so breit ist wie die Lücke ($ww' = aa'' = aa' + b'b$).

Aus der Figur ist auch weiter zu ersehen, daß der Durchmesser des durch das Loch ww' entstehenden Sonnenbildes, von der Mitte des Saumes aus gemessen ($a'b'$), genau so groß ist, als jenes Sonnenbild sein muß, welches durch ein punktförmiges Loch zustande kommt, das genau in der Mitte des weiten Loches ww' gelegen ist.

Die charakteristische Strecke $zz' = zz''$ ist abhängig von der Öffnung ww' und läßt sich aus dieser leicht berechnen. Es ist

$$zz' = zz'' = \operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{ww'}{2}$$

$$\operatorname{cotg} 16' = 211{\cdot}3354.$$

Es ergibt sich somit

	zz'
für $ww' = 0{\cdot}5\ mm$	$0{\cdot}0528\ m$
1	$0{\cdot}1057$
2	$0{\cdot}2113$
3	$0{\cdot}3170$
4	$0{\cdot}4326$
5	$0{\cdot}5283$
⋮	
10	$1{\cdot}1057$
20	$2{\cdot}1134$
⋮	
100	$10{\cdot}5668$
⋮	

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Wenn man also den Durchmesser des Sonnenbildes von der Mitte des Schattenrandes ($a'b'$) aus mißt, so ist derselbe $= E \times 0 \cdot 0093$, so groß also, wie wenn das Sonnenbild durch eine Kamera entstanden wäre, deren punktförmige Öffnung in der Mitte des Loches ww' gelegen ist.

Der helle Innenkreis ($a''b''$) entsteht also gewissermaßen durch eine Lochkamera mit punktförmigem Loche (z''), welches in der Entfernung $E - zz''$ gelegen ist.

Der helle Innenkreis ist gleichmäßig beleuchtet,[1] der umgebende Schattenring weist keine gleichmäßige Lichtstärke auf, vielmehr nimmt die Lichtstärke desselben nach außen hin ab.

Die Lichtstärke des Innenkreises ($a''b''$) läßt sich bestimmen, desgleichen die mittlere Lichtstärke des Schattenringes; aber die Abnahme der Lichtstärke von innen nach außen kann nach der von mir angewendeten Methode der Messung der chemischen Lichtstärke nicht mehr mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmt werden. Hierauf bezügliche Messungen folgen im Abschnitte VII.

V. Einfluß der Form und Größe des Loches der Lochkamera auf die Entstehung der Sonnenbilder.

Es ist seit langer Zeit bekannt,[2] daß die Form des Loches der Kamera auf die Gestalt des Sonnenbildes keinen Einfluß ausübt. Durch ein drei- oder viereckiges oder sternförmig gestaltetes Loch wird — von einer bestimmten Entfernung des Loches zur Projektionsfläche angefangen — ebenso ein

---

[1] Theoretisch betrachtet ist dies insofern nicht vollkommen richtig, als die Lichtstärke der Sonne nicht an allen Punkten die gleiche ist, vielmehr von der Mitte der Sonnenscheibe zum Sonnenrand abnimmt. Für unsere Zwecke kann aber die Sonnenscheibe als gleichmäßig beleuchtet angenommen werden.

[2] Franciscus Maurolycus (geb. 1494, gest. 1575) studierte als erster genau den Strahlengang des Lichtes in der Lochkamera und zeigte in seiner 1575 herausgegebenen Schrift *Photismi de lumine in umbra*, daß das Sonnenbild selbst bei eckiger Form des Loches kreisrund sein müsse. Priestley, Geschichte der Optik. Deutsche Ausgabe, 1776, p. 30. Zitiert nach Eder's Geschichte der Photographie, 3. Aufl., Halle 1905, p. 33.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

kreisförmiges Sonnenbild wie durch eine kreisförmige Öffnung erzeugt.

Die Beziehung der Form der Öffnung zur Entstehung der Sonnenbilder ist für uns von besonderem Interesse, weil, wie ich später noch genauer zeigen werde, die im Laube vorhandenen Löcher, durch welche beim Durchgange der Sonnenstrahlen die Sonnenbilder entstehen, niemals völlig kreisrund sind, sondern in der Regel einen polygonalen Umriß besitzen und sehr häufig drei- oder vierseitig sind.

Da die Sonnenstrahlen nahezu parall laufen, so wird ein dreieckiges Loch bei geringer Entfernung von der Bildfläche ein nahezu dreieckiges Bild erzeugen und erst in einer bestimmten Entfernung macht sich die Divergenz der Strahlen so bemerkbar, daß an Stelle des Dreieckes ein kreisrundes Sonnenbild entsteht. Bei aufmerksamer Betrachtung erkennt man aber, daß selbst in sehr kleiner Entfernung des dreieckigen Loches von der Bildfläche die Ecken nicht scharf sind, sondern abgerundet erscheinen, indem in jeder der drei Ecken ein unvollständiges, durch Beugung modifiziertes Sonnenbild zum Vorschein kommt (Fig. 3). Entfernt man die Bildfläche, so entstehen im Anschluß an die in den drei Ecken gebildeten unvollständigen Sonnenbilder unendlich viele Sonnenbilder, welche sich zu drei hellen, den Dreieckseiten parallelen Streifen vereinigen, die einen dunkleren dreiseitigen Innenraum umschließen (Fig. 3). Bei weiterer Entfernung der Bildfläche hellt sich dieser Innenraum immer mehr und mehr auf, aber die den drei Ecken angehörigen Sonnenbilder wachsen immer mehr und mehr und beginnen miteinander zu verschmelzen, wobei sie von dunkleren Säumen umgeben erscheinen. Diese drei Sonnenbilder verschmelzen immer mehr und mehr, desgleichen die drei Säume und schließlich erscheint ein einziges, von einem

Fig. 3.

Photographisch dargestellte Beleuchtung einer von direktem, durch eine dreiseitige Lücke hindurchgegangenem Sonnenlichte bestrahlten Fläche. Nach direkter Aufnahme, also in natürlicher Größe. Entfernung der dreiseitigen Lücke vom photographischen Papier = 30 *cm*.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

dunklen Saum umschlossenes Sonnenbild. Alle diese Helligkeitsänderungen, die ich anfangs auf optische Täuschungen zurückzuführen geneigt war, entsprachen faktischen Intensitätsänderungen, wie die photographische Reproduktion all der beschriebenen Bilder lehrt.[1]

VI. Über die Entfernungen, in welchen bei polygonaler Gestalt des Loches der Lochkamera die Sonnenbilder entstehen.

Die in der Laubkrone der Bäume oder im Baumschatten am Boden entstehenden Sonnenbilder kommen durch Lücken im Laubwerk zustande, welche gewöhnlich einen beiläufig polygonalen Umriß haben und sehr häufig drei- oder vierseitig sind.

Die durch solche polygonal gestaltete Löcher hindurchgehenden Sonnenstrahlen erzeugen in geringer Entfernung von der Öffnung auf irgendeiner Projektionsfläche helle Flecken, welche die Gestalt der betreffenden Polygone haben. Auf die in den Ecken solcher hellen Polygone entstehenden unvollkommenen Sonnenbilder und über die sie verbindenden hellen

[1] Herr Dr. W. Schmidt hat mir nach Einsichtnahme in die Fig. 3 folgende Erläuterung gegeben: »Die helleren Streifen an den Seiten des Dreieckes dürften Beugungserscheinungen sein, hervorgerufen durch eine Art etwas komplizierter Interferenz der an der Kante des Schirmausschnittes passierenden Strahlen. Ganz genau genommen, müßte da der äußerste Saum etwas bläulich gefärbt sein, doch wird sich dies kaum beobachten lassen.«

»Die Entfernung des helleren Streifens vom Rande des Schattens wäre der Größenordnung nach ganz roh vergleichbar mit $\sqrt{2a\lambda}$, wenn a die Entfernung des auffangenden Schirmes vom Diaphragma, λ die Wellenlänge des Lichtes bedeutet. Wählt man die letztere zu $0{\cdot}00005$ *cm*, was etwa der Grenze zwischen Grün und Blau im Spektrum entspricht, so erhält man jenen Abstand von der Größenordnung noch vergleichbar:

$$0{\cdot}01.\sqrt{a},$$

d. h. der Streifen stünde z. B. bei einer Entfernung des Schirmes von 1 *m* beiläufig 1 *mm* vom Rande der Figur ab; bei einer Entfernung von 25 *cm* die Hälfte davon etc.«

»Es würde sich so auch das Verschwimmen der Erscheinung in größeren Entfernungen erklären lassen.«

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Streifen wurde schon oben das für unsere Betrachtung Wichtigste gesagt. Mit der Entfernung der Projektionsfläche von der Öffnung runden sich die Formen der hellen Sonnenflecken immer mehr und mehr aus und in einer bestimmten Entfernung werden sie — senkrechten Einfall der Strahlen vorausgesetzt — zu Kreisflächen, welche man als Sonnenbilder betrachtet.

Es schien mir des Interesses wert, experimentell zu prüfen, in welchen Entfernungen von der Öffnung die Kreisform der hellen Flecken zu entstehen beginnt, wenn die Größe der Öffnung variiert wird. Der Einfachheit halber und weil dies den in der Laubkrone zustande kommenden Lücken am meisten entspricht, habe ich bloß mit drei- und vierseitigen Öffnungen experimentiert.

a) Versuche mit gleichseitigen Dreiecken.

L = Länge der Dreieckseite, E = Entfernung, in welcher der helle Fleck die Kreisgestalt anzunehmen beginnt.

1.

L	E	Beleuchtungsverhältnisse
5 *mm*	53·7 *cm*	Sonnenhöhe 29°
10	111·1	Himmelsbedeckung B_0
15	167·8	Sonne S_{3-4}
20	214·7	Chemische Intensität des
30	322·3	Lichtes nahezu konstant,
50	537·1	nämlich 0·459 bis 0·508
100	1200·0 (?)[1]	

Man sieht wohl auf den ersten Blick, daß die Entfernungen, in welchen die Kreisform des hellen Fleckes (Sonnenbild) zu erscheinen beginnt, der Länge der Dreieckseite wenigstens angenähert proportioniert erscheinen.

[1] Das Sonnenbild näherte sich in seiner Helligkeit schon sehr der Helligkeit der Umgebung, so daß die Bestimmung sehr ungenau ausfiel.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Berechnet man die Entfernung für eine Dreieckseite von 5 *mm* aus den angestellten Beobachtungen, so wird man sehen, inwieweit die gemessene Entfernung von der berechneten abweicht.

5 *mm*	.....	$53 \cdot 7 = 1 \times 53 \cdot 7$
10	.....	$55 \cdot 5 = {}^1/_2 \times 111 \cdot 1$
15	.....	$55 \cdot 9 = {}^1/_3 \times 167 \cdot 8$
20	.....	$53 \cdot 3 = {}^1/_4 \times 214 \cdot 7$
30	.....	$53 \cdot 7 = {}^1/_8 \times 322 \cdot 3$
50	.....	$53 \cdot 7 = {}^1/_{10} \times 537 \cdot 1$
100	.....	$60 \cdot 0 = {}^1/_{20} \times 600 \cdot 0$

Sieht man von dem zuletzt erhaltenen Wert ab, welchem eine sehr ungenaue Messung zugrunde liegt, so findet man eine auffallende Übereinstimmung: es sind die Entfernungen, in welchen die Sonnenbilder zu erscheinen beginnen, wirklich den Breiten der Öffnungen proportional. Die faktischen Abweichungen sind einfach Beobachtungsfehler und es ist eigentlich überraschend, wie klein diese Beobachtungsfehler in diesem Fall ausgefallen sind.[1]

---

[1] Herr Dr. W. Schmidt hat aus den ihm von mir mitgeteilten beobachteten Werten die prozentuellen Fehler berechnet, indem er aus den sechs genau ermittelten Werten (unter Ausschluß des zuletzt angegebenen als unsicher bezeichneten) das Mittel $\frac{3238}{6} = 54 \cdot 3$ zog, wobei sich folgende Zahlen ergaben:

Dreieckseite	Fehler in Prozenten
5 *mm*	$- 1 \cdot 1$
10	$+ 2 \cdot 3$
15	$+ 3 \cdot 1$
20	$- 1 \cdot 2$
30	$- 1 \cdot 1$
50	$- 1 \cdot 1$

Die Fehlergrenzen liegen also zwischen $+ 3 \cdot 1$ und $- 1 \cdot 1\%$. Die Abweichungen bieten das Bild zufälliger Fehler dar; man ist also ohne weiteres berechtigt, das oben ausgesprochene Proportionalitätsgesetz — innerhalb sehr weiter Grenzen — als erfüllt anzusehen.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

2.

L	E	Beleuchtungsverhältnisse
5 *mm*	96 *cm*	Sonnenhöhe 38°
10	180	Himmelsbedeckung B_0
15	230	Sonne S_{3-4}, dann S_{2-3}
20	260	I = chemische Intensität des
25	294	Lichtes: anfangs 0·666,
30	355	dann sinkend bis 0·444
40	475	
50	583	
100	nicht bestimmbar	

Berechnet man wie im früheren Falle die Entfernung für 5 *mm*, so erhält man:

5 *mm*	96·6 *cm*	$= 1 \times 96{\cdot}0$
10	90·0	$= {}^1/_2 \times 180$
15	76·6	$= {}^1/_3 \times 230$
20	65·0	$= {}^1/_4 \times 260$
25	58·8	$= {}^1/_5 \times 294$
30	59·1	$= {}^1/_6 \times 355$
40	59·3	$= {}^1/_8 \times 475$
50	58·3	$= {}^1/_{10} \times 583$

Hier erkennt man schon starke Abweichungen von der oben angegebenen Regel. In den Versuchsbedingungen ergab sich aber ein großer Unterschied gegenüber dem früheren Falle: die Lichtintensität war im früheren Fall eine sehr konstante, hingegen im zweiten Fall eine sehr wechselnde. Es nahm nämlich die Lichtstärke im Laufe des Versuches auffallend ab. Dies führt auf den Gedanken, daß mit zunehmender Lichtstärke die Entfernung, in welcher der helle Fleck als Kreis zu erscheinen beginnt, selbst bei gleicher Öffnungsweite zunimmt. Dies geht übrigens schon aus dem Vergleiche der Lichtstärken hervor, welche in beiden Fällen herrschten. Im ersten Falle war die Lichtintensität fast völlig konstant geblieben, im zweiten Falle sank die Lichtstärke beiläufig so

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

weit, daß eine starke Annäherung der Beleuchtung an jene der vorangegangenen Beobachtungsreihe und dementsprechend eine Annäherung an jene Distanzen (E) sich einstellte, welche dort während der ganzen Beobachtungszeit herrschten.

Ich habe noch zahlreiche andere Beobachtungsreihen mit dreiseitigen und auch mit quadratischen Öffnungen durchgeführt, welche ich hier nicht weiter anführen will, da ich zur vollen Einsicht über den Zusammenhang zwischen dem Beginn des Entstehens der Sonnenbilder zu L, E und I nicht gelangen konnte.

Trotzdem kann ich aus meinen Beobachtungen folgende Sätze ableiten:

1. Bei konstanter Beleuchtung durch die Sonne steigt die Entfernung, in welcher bei drei- oder vierseitigen (quadratischen) Öffnungen die Sonnenbilder zu entstehen beginnen, proportional der Weite der Öffnung.

2. Die Entfernung, in welcher bei drei- oder vierseitiger (quadratischer) Öffnung die Sonnenbilder zu entstehen beginnen, wächst nach den angestellten Versuchen mit der Zunahme der Lichtstärke.

Es ist wahrscheinlich, daß der erste Satz nicht nur für Öffnungen gilt, welche Dreiecke oder Quadrate sind, sondern für jede andere Form der Öffnung.

VII. Lichtintensitätsverhältnisse der Sonnenbilder.

Ist das Loch, welches im Laube sich vorfindet und nach abwärts Sonnenbilder entwirft, punktförmig, so sind die Intensitätsverhältnisse sehr einfach: über dem Loch herrscht die Intensität des äußeren direkten Lichtes und vom Loch an nimmt sie nach abwärts in umgekehrt quadratischem Verhältnis ab. Komplizierter sind die Verhältnisse der Intensität, wenn das Loch meßbare Dimensionen hat, einige Millimeter oder gar Zentimeter besitzt.

Wenn man den bei Entstehung der Sonnenbilder maßgebenden Strahlengang betrachtet (Fig. 2), so ist man bei

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

flüchtiger Beurteilung vielleicht geneigt, anzunehmen, daß vom Loch angefangen bis zum Schnittpunkte der Randstrahlen der Sonne (z'') eine Zunahme der Lichtstärke stattfinden und von da ab erst eine Verminderung der Lichtstärke sich einstellen müßte. Allein bei genauer Überlegung zeigt sich, daß z'' kein Brennpunkt ist, vielmehr in den Lichtraum $wz''w'$ von allen Punkten der Sonne Licht einstrahlt. Der bezeichnete Lichtraum darf also in allen Schichten bis z'' als gleich beleuchtet vorausgesetzt werden. Die in der Figur gezeichneten Randstrahlen geben ja doch nichts anderes als die Schattengrenzen des genannten Lichtraumes an. Einigermaßen störend tritt dem Beurteiler die rätselhafte, oben schon berührte relative Dunkelheit des dreiseitigen Innenraumes entgegen (Fig. 3). Es kommt also darauf an, von ww' an bis z'' die Lichtintensität messend zu verfolgen. Ich führte den Versuch nach meiner gewöhnlich in Anwendung gebrachten Methode durch, indem ich die chemische Lichtintensität in bestimmten Distanzen von ww' an bis z'' ermittelte.

Es wurden zahlreiche Beobachtungsreihen bei vollem Sonnenschein durchgeführt, wobei dem Loche der Lochkamera die verschiedensten Formen (Kreis, Dreieck, Viereck etc.) und die verschiedensten Dimensionen gegeben wurden und wobei sich tatsächlich herausstellte, daß bei senkrechter Lage der Projektionsfläche in allen Distanzen von ww' bis z'' die Lichtstärke die gleiche blieb, von hier abwärts aber die Lichtstärke in mehr oder minder starker Annäherung in umgekehrt quadratischem Verhältnis der Entfernung vom Diaphragma abnahm.[1] Trotz der Fehlerquellen und trotz des Umstandes, daß von den beobachteten Intensitäten am jeweiligen Sonnenbild die lokal herrschende Stärke des diffusen Lichtes in Abzug zu bringen war, was ja wieder zu einer Fehlerquelle werden kann, stimmen die Zahlen ganz gut.

Bleibt man bei Ermittlung der Lichtstärke möglichst in der Achse, so stimmen die Werte besser, als wenn man dem

[1] Für Sonnenbilder, welche in Baumkronen entstehen, habe ich dieses Verhältnis früher schon experimentell festgestellt. »Lichtgenuß«, p. 167.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Schattenrande sich nähert. Die Lichtstärke des Schattenrandes scheint nach meinen Beobachtungen einem komplizierten Gesetze zu folgen. Für unsere Zwecke genügt die Feststellung, daß dort, wo das Sonnenbild zu entstehen beginnt, seine Lichtstärke zum mindesten angenähert dem oben angeführten Gesetz entspricht. Es ist wohl einleuchtend, daß das angeführte Gesetz (Abnahme der Lichtstärke der Sonnenbilder in umgekehrt quadratischem Verhältnis zur Entfernung vom Loche der Kamera an gerechnet) desto vollständiger erfüllt ist, je kleiner das Loch der Lochkamera ist. Vollständig erfüllt wäre das Gesetz bei der Annahme eines punktförmigen Loches, in welchem Fall allein das Sonnenbild als gleichmäßig beleuchtet anzusehen ist.

Meine diesbezüglichen Messungen gaben durchwegs gleichsinnige Resultate. Ich hebe aus meinen Beobachtungsreihen die nachfolgende als Beispiel heraus.

9. Oktober 1908, 12^h m. S_{3-4}, B_0.[1]

Loch: ein gleichseitiges Dreieck mit einer Seitenlänge = 15 *mm*. Öffnungsweite des Loches = Durchmesser des eingeschriebenen Kreises = 8·66 *mm*.

Entfernung vom Loche	Relative Zeitwerte für die Bestimmung der chemischen Lichtintensität[2]	Intensität in Bunsen-Roscoe'schem Maße
0 *cm*	1116	0·500
10	1136	0·508
20	1135	0·508
30	1125	0·504
40	1139	0·510
50	1150	0·515
80	1116	0·500
100	946	0·490
120	915	0·410
140	803	0·336
160	611	0·274
180	442	0·241
200	406	0·182
220	334	0·150

[1] Über die Bedeutung der Symbole S_{3-4}, B_0 siehe weiter unten p. 798.

[2] Die Belichtung des Normalpapiers erfolgte in allen Distanzen durch eine bestimmte Zeit (10″) und nach der indirekten Methode wurde bestimmt, welche

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Diese Beobachtungsreihe zeigt deutlich, daß in dem Lichtkegel $wz''w$ (Fig. 2) bis zum Scheitel desselben (z'') die Lichtstärke angenähert die gleiche blieb, daß aber in dem nach abwärts gehenden Lichtkegel, dessen senkrecht zur Achse stehende Schnittflächen die Sonnenbilder darstellen, die Lichtstärke angenähert in umgekehrt quadratischem Verhältnis der Entfernung abnimmt. Der Punkt z'' muß in dieser Versuchsreihe zwischen 80 und 100 *cm* Entfernung von der Öffnung ww' entfernt gelegen gewesen sein, denn zwischen diesen beiden Distanzen beginnt die Lichtstärke plötzlich zu sinken.

Zahlreiche andere Beobachtungen haben gelehrt, daß unter sonst gleichen Verhältnissen die Lichtstärke des Sonnenbildes desto höher liegt, je größer die Öffnung ist, durch welche die das Sonnenbild erzeugenden Strahlen durchgehen.

Nach Versuchen, welche ich mit dreiseitigen (gleichseitigen) Öffnungen anstellte, erhält man, wie wir gesehen haben (p. 774 ff.), noch Sonnenbilder, wenn die Dreieckseite 40 *mm* mißt, unter sehr günstigen Verhältnissen sogar noch bei Dreiecken mit 100 *mm* Seitenlänge. Darüber hinaus ist die Lichtstärke des durchgehenden direkten Sonnenlichtes von der bei freier Exposition sich ergebenden nicht mehr zu unterscheiden.

Bei punktförmiger Öffnung der Lochkamera besitzt mit einer schon angegebenen Einschränkung das Sonnenbild an allen seinen Punkten die gleiche Lichtstärke. Aber wie oben schon des näheren auseinandergesetzt wurde, hat man bei durch größere Öffnungen der Lochkamera entstandenen Sonnenbildern einen hellen Kern vor sich, der von einem dunklen Saum umschlossen ist. Die Intensität des Innenkreises läßt sich mit ausreichender Genauigkeit ermitteln, aber bezüglich der Lichtstärke des Saumes läßt sich nur ein mittlerer Wert angeben,

---

Zeit verfloß, bis bei einer bestimmten niederen Intensität der im obigen Versuch erzielte Farbenton erreicht wurde. Die so erhaltenen Zeiten sind den Intensitäten, welche in den einzelnen Distanzen (0, 10, 20 *cm*) herrschten, direkt proportioniert. Es wurde in möglichster Nähe des Sonnenbildes die Stärke des diffusen Lichtes ermittelt und der erhaltene Wert von der jeweiligen Intensität des Sonnenbildes abgezogen. Die so korrigierte Intensität ist in der obigen Tabelle berücksichtigt.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

da, wie wir gesehen haben, die Lichtstärke nach außen hin abnimmt. Ich habe diesbezüglich mannigfache messende Versuche angestellt, von welchen ich einige mir lehrreich erscheinende anführen will.

Zunächst hebe ich aus meinen Beobachtungen einen Fall hervor, in welchem ich die in einem kreisförmig gewordenen Bilde im Kern und im Saume herrschend gewesenen Lichtstärken ermittelte.

Bei klarem, wolkenlosem Himmel wurde an einem offenen Südfenster zu Mittag durch ein gleichseitiges Dreieck ein Sonnenbild erzeugt, welches in einer Entfernung von 1·8 *m* auf Bunsen-Eder-Papier[1] ein Sonnenbild von 15 *mm* Durchmesser erzeugte. An dem kreisförmigen Bilde konnte man deutlich einen hellen Kern und einen dunklen Saum unterscheiden.

Es wurde der Versuch gemacht, die mittlere Lichtstärke zu bestimmen, welche den Saum, und jene Lichtstärke, welche den Kern hervorrief. Es geschah dies nach meiner Methode der indirekten Bestimmung der chemischen Lichtintensität.

Es wurde zunächst das Verhältnis der diffusen zur direkten Strahlung bestimmt. Sodann wurde auf dem lichtempfindlichen Papier die gleichzeitig erscheinende Schwärzung in diffusem Licht und die im gemischten Sonnenlicht ermittelt.

Die indirekte Bestimmung ergab für das diffuse Licht den Zeitwert von 42″, für das gemischte Licht den Zeitwert 1265″. Dem Sonnenlicht entsprach somit ein Zeitwert 1265 — 42″ = = 1223″.

Nun wurden die Zeitwerte für den Kern der Kreisfläche und für den Saum ermittelt; ersterer betrug 760″, letzterer 490″.

---

[1] Mit dem Namen »Bunsen-Eder'sches Papier« bezeichne ich jene Form des Normalpapiers, welche nach dem von Eder angegebenen Verfahren haltbar gemacht wurde. Das Bunsen'sche Normalpapier hält sich durch 16 Stunden, während das nach dem Eder'schen Verfahren haltbar gemachte Normalpapier — zweckmäßige Aufbewahrung vorausgesetzt — sich durch Monate hält. Seine Empfindlichkeit ändert sich allerdings mit der Zeit; es muß deshalb von Zeit zu Zeit die Relation zum Originalnormalpapier ermittelt werden. Siehe »Lichtgenuß«, p. 29.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Es verhielt sich somit die Intensität (der Sonnenstrahlung), welche im Kern herrschte, zu der (mittleren) Intensität, welche den Saum hervorrief, wie $760 : 490 = 1{\cdot}551 : 1$.

Berechnet man die (relative) chemische Intensität des herrschenden Sonnenlichtes zu jener, welche im Kern und im Saum des Sonnenbildes wirksam war, so erhält man folgende Verhältniszahlen: $1223 : 760 : 490 = 2{\cdot}495 : 1{\cdot}551 : 1$.

Da zur Beobachtungszeit die chemische Intensität des Sonnenlichtes $0{\cdot}600$ betrug, so ergibt sich, daß diese sich zur Intensität des Sonnenbildes im Kern und im Saum verhielt wie $0{\cdot}600 : 0{\cdot}372 : 0{\cdot}241$.

Durch ein anderes Beispiel will ich zeigen, daß die Intensität des Lichtes der Sonnenbilder mit der Weite der Öffnung der Lochkamera zunimmt.

Bei völlig klarem Himmel und gänzlich unbedeckter Sonne ($B_0 S_4$) wurden an einem Südfenster zu Mittag gleichzeitig zwei Sonnenbilder erzeugt und in einer Entfernung von $1{\cdot}88$ *m* auf Bunsen-Eder-Papier projiziert. Das eine (*a*) kam durch eine Öffnung zustande, welche ein gleichseitiges Dreieck mit 3 *mm* Seite darstellte, das zweite (*b*) durch eine dreiseitige Öffnung mit 10 *mm* Seitenlänge.

Ohne weitere Prüfung erkannte man, daß das durch das kleinere Dreieck entstandene Sonnenbild *a* durch eine geringere Lichtstärke zustande gekommen sein mußte als das durch das größere Dreieck entworfene Bild *b*.

Um bei gleicher Lichtstärke auf dem lichtempfindlichen Papier den Ton des Bildes zu erreichen, waren 330″ erforderlich, hingegen waren 610″ notwendig, damit der Ton des Bildes *b* darauf erschien. Ich bemerke, daß die angegebenen Zeitwerte schon durch Beachtung der Einwirkung des diffusen Lichtes korrigiert sind.

Im Bild *a* ließ sich kein Intensitätsunterschied zwischen Saum und Kern des Bildes nachweisen; hingegen war in *b* der Unterschied zwischen Saum und Kern nach meiner Methode bestimmbar. Der oben angeführte Wert (610″) bezog sich auf den Kern, hingegen betrug die (mittlere) Lichtstärke des Saumes 420″. Die Intensitäten von Kern zu Saum verhielten sich also wie $610 : 420 = 1{\cdot}452 : 1$.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die Intensitäten von $a : b$ (Kern) standen also im Verhältnis wie $330 : 610 = 1 : 1 \cdot 848$.

In welchem Verhältnis bei gleicher äußerer Sonnenbeleuchtung und ungleicher Öffnungsweite die Lichtstärken der resultierenden Bilder stehen, habe ich nicht näher untersucht und aus meinen Beobachtungen nur den obigen gesperrt gedruckten Satz abgeleitet. Ein oberer Grenzwert ist offenbar gegeben, wenn infolge der Weite der Öffnung gar kein Sonnenbild mehr erscheint. Dann ist die durch die Lücke hervorgebrachte Lichtstärke der des wirkenden Sonnenlichtes gleich.

VIII. Entstehung der Sonnenbilder im Laube der Gewächse.

Die Sonnenbilder entstehen durch im Laube befindliche Lücken. Diese Lücken werden auf die mannigfaltigste Weise durch Abschnitte des Laubes, auch der Blattstiele, zum Teil sogar der Stengel gebildet. Sie liegen entweder (nahezu) in einer Ebene, wie z. B. in gefiederten Blättern (*Robinia*, *Fraxinus*, *Sorbus aucuparia* etc.) und setzen sich aus Blattabschnitten der Fiederblättchen zusammen oder sie entstehen aus hintereinander befindlichen Blattabschnitten. Wenn diese nicht weit voneinander abstehen, so wirkt die so entstandene Lücke so wie eine in einer Ebene gelegene Öffnung.

Die Lücke ist gewöhnlich ein freier Raum, welcher von Blattabschnitten und, wie schon gesagt, wohl auch von Stengelteilen gebildet wird. Sie kann aber auch ein Raum sein, welcher gewissermaßen von einem dicken Balken durchzogen wird, aber nichtsdestoweniger von einer bestimmten Entfernung an ein reines Sonnenbild liefert. An dem gefiederten Blatte von *Sorbus aucuparia* begrenzen die gegenüberstehenden Blättchen Lücken, welche die Gestalt von Rhomben (oder Trapezoiden) haben (Fig. 4). Jeder solche Rhombus ist von einem Stück des gemeinschaftlichen Blattstieles durchzogen. In einer bestimmten Entfernung entwirft das Sonnenlicht eine Reihe von Sonnenbildern, welche der Richtung des gemeinschaftlichen Blattstieles folgt. Obgleich durch jeden Rhombus ein breiter Längsbalken hindurchzieht, besitzt jedes Sonnenbild doch einen hellen Kern. Ähnlich so

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

ist es bei den gleichfalls einfach gefiederten Blättern von *Ailanthus glandulosa*, wo die unteren Abschnitte der gegenüberstehenden Fiederblättchen sich zu einem beiläufig sechsseitigen Polygon zusammensetzen, das von einem Stück

Fig. 4.

Photographisches Negativbild eines Blattes von *Sorbus aucuparia*. Entfernung des Objektes von dem photographischen Papier (Entwicklungspapier) = 0.

des gemeinschaftlichen Blattstieles der Länge nach durchsetzt ist. In einer bestimmten Entfernung vom Blatt erscheint nun eine Reihe von Sonnenbildern, welche der Zahl der genannten Lücken entspricht und der Richtung des gemeinschaftlichen Blattstieles folgt. Daß der durchgehende Balken die Entstehung

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

der Sonnenbilder nicht hindert, wird durch weiter unten folgende Beobachtungen klar werden, denen zufolge die Schatten schmaler Objekte im Sonnenlicht in bestimmter Entfernung verschwinden.

Fig. 5.

Photographisches Negativbild des Schattens eines Blattes von *Sorbus aucuparia*. Entfernung des Blattes vom photographischen Papier, auf welches der Schatten auffiel = 50 *cm*. Jede der dreieckigen Lücken erzeugt ein Sonnenbild. Je zwei nebeneinanderliegende Sonnenbilder decken sich teilweise und rufen die starke Belichtung der Verbindungsstelle beider Sonnenbilder hervor.

Die Menge der im Laub entstehenden Lücken ist je nach der Belaubung der einzelnen Gewächse höchst verschieden. Blickt man bei Sonnenschein in der Richtung nach oben in das Laub einer voll entwickelten Buche, so erblickt man nur wenige Lücken. Hingegen ist die Zahl der Lücken bei *Robinia pseudacacia* eine außerordentlich große. Bei Weiden (z. B. *Salix incana*) ist man überrascht über die enorm große

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Zahl von Lücken. Im allgemeinen kann man sagen, daß die Zahl der Lücken mit Abnahme der Blattgröße zunimmt. Doch spielt begreiflicherweise diesbezüglich auch die Zahl und Anordnung der Blätter eine gewisse Rolle.

Fig. 6.

Photographisches Negativbild des Schattens eines Blattes von *Sorbus aucuparia*. Entfernung des Blattes vom photographischen Papier, auf welches der Schatten auffiel = 150 *cm*. Es erscheint eine Reihe von Sonnenbildern, welche der Richtung des gemeinschaftlichen Blattstieles folgen, da jedes Sonnenbild durch eine rhombische Lücke hervorgerufen wird, welche durch je zwei dreieckige Lücken gebildet werden (siehe Fig. 4). Durch die rhombische Lücke geht wie ein Balken ein Stück des gemeinschaftlichen Blattstieles hindurch, welches aber, wie man sieht, die Entstehung eines Sonnenbildes nicht verhindert.

Die Form der Lücken ist weniger wechselnd, als man von vornherein annehmen sollte. Betrachtet man das Laub von unten mit einem Fernglas (z. B. einem Operngucker), so lassen sich die Formen der Lücken gut beurteilen. Man findet dieselben seltener punktförmig als polygonal. Sehr häufig sind sie dreiseitig, aber auch vier- und fünf- und, wie ich oben zeigte, sechsseitig, häufig mit abgerundeten Seiten. Drei- und vierseitige Lücken scheinen die Regel zu bilden. Seltener sind runde Lücken, z. B. hin und wieder bei *Broussonetia papyrifera*.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die Größe der Lücke ist maßgebend für die Entfernung, in welcher die Sonnenbilder sich zu bilden beginnen (siehe oben p. 775 bis 777).

Bei *Selaginella* sp., *Pinus Laricio*, *Buxus sempervirens*, *Picea excelsa* begannen die Sonnenbilder in Entfernungen von 20 bis 28 *cm* zu erscheinen. Bei *Syringa vulgaris*, *Köhlreuteria paniculata* und *Sambucus nigra* erscheint hingegen die Mehrzahl der Sonnenbilder erst bei 120 bis 250 *cm*. Doch treten einzelne Sonnenbilder bei diesen drei Holzgewächsen auch in kleineren Entfernungen auf.

Genaue Werte bekommt man wohl nicht, im großen ganzen ergeben sich aber doch, wie aus den angeführten Zahlen zu ersehen ist, für die einzelnen Gewächse typische Werte.

Wie wir oben gesehen haben, ist selbst bei der gleichen Sonnenbeleuchtung die Intensität der das Bild hervorrufenden Strahlung selbst bei ein und derselben Größe der Bilder eine verschiedene und hängt, wie wir gesehen haben, von der Größe der Lücke in dem Sinn ab, daß mit der Größenzunahme der Lücken und bei gleichem Durchmesser der Sonnenbilder die Lichtstärke, welche die Sonnenbilder darbieten, wächst.

Hingegen ist die Größe der Sonnenbilder von der Entfernung abhängig, in welcher, von der Lücke aus gerechnet, diese Bilder entstehen.

Ob ein im Schatten eines Baumes liegender rundlicher Lichtfleck ein Sonnenbild ist oder nur zu sein scheint, wird man gewöhnlich leicht beurteilen können, wenn man das fragliche Bild auf eine weiße Fläche derart projiziert, daß die Sonnenstrahlen senkrecht auffallen. Wenn der fragliche rundliche Fleck ein Sonnenbild ist, so muß derselbe vollkommen kreisförmig erscheinen.

Täuschungen kommen dennoch vielfach vor; sie werden dadurch herbeigeführt, daß durch mehrere nicht weit voneinander liegende Lücken ein heller, rundlicher Fleck zustande kommt.

Solche rundliche Flecken erscheinen oft bei Sonnenbeleuchtung im Schatten von Fichtenwäldern. Aus der oft enormen Größe solcher Sonnenbilder läßt sich leicht ableiten,

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

daß hier keine eigentlichen Sonnenbilder vorliegen. Unter mittleren Verhältnissen erreicht die Fichte Höhen von 20 bis 26 *m*, im 100jährigen Umtriebe bis 32 *m*, im höchsten Alter 35 bis 40 *m*, im Urwaldrest bis 50 *m*.[1] Nimmt man eine Höhe von 30 *m* an und nimmt man ferner an, daß die am Boden erscheinenden Sonnenbilder nahezu im Gipfel entstehen, so können dieselben unter den gegebenen Bedingungen und nach den oben gegebenen Berechnungen höchstens einen Durchmesser von etwa 30 *cm* haben. Aber man kann in Fichtenwäldern runde, helle Flecken am Waldboden beobachten, die einen doppelt so großen Durchmesser aufweisen und mehr, und erkennt, daß dieselben keine Sonnenbilder darstellen, sondern durch große Lücken der Krone direkt zustande gekommen sind. Übrigens würden in so großer Distanz entstandene Sonnenbilder schon so lichtschwach sein, daß sie von dem Schattenlichte des Waldbodens reichlich überstrahlt werden würden. Denn bei einer Lichtstärke = 1 (im Mai zu Mittag bei klarem Himmel) beträgt die Lichtstärke im Sonnenbild in einer Entfernung von 30 *m* beiläufig nur Tausendstel der Einheit, während das Schattenlicht des Bodens im hochstämmigen Fichtenwald im Mittel etwa $^1/_{60}$ beträgt.[2] Es ist also ersichtlich, daß in einer Entfernung von 30 *m* selbst ein bei sehr intensiver Strahlung entstandenes Sonnenbild in dem relativ sehr hellen Schatten des Fichtenwaldes bis zur völligen Unkenntlichkeit verschwinden müßte.

Nach den früheren Auseinandersetzungen wird man auch verstehen, daß, wenn im Fichtenwalde zufällig[3] ein Sonnenbild dadurch zustande gekommen sein sollte, daß in großer Höhe einige schon entblätterte Zweige eine größere Lücke bildeten, ein solches Sonnenbild in einer Entfernung von 20 oder gar 30 *m* schon so lichtschwach geworden sein müßte,

---

[1] Wilhelm und Hempel, Die Bäume und Sträucher des Waldes, Bd. I, p. 68, Wien (1889).

[2] Näheres über das Schattenlicht des Fichtenwaldes siehe »Lichtgenuß«, p. 164.

[3] In der Regel werden die Sonnenbilder bei der Fichte doch nur durch Lücken zustande kommen, welche zwischen den Nadeln sich bilden, oder durch übereinanderstehende Nadeln, deren Richtungen sich schneiden.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

daß es im Lichte des Baumschattens gewiß nicht mehr gesehen werden könnte.

IX. Schatten der Blätter bei Bestrahlung durch Sonnenlicht.

Wären die Sonnenstrahlen untereinander vollkommen parallel, so müßten die Schatten der einzelnen Blätter stets dieselbe Form und Größe besitzen. Diese Voraussetzung trifft aber nicht zu und deshalb sind die im Sonnenlicht entstehenden Schatten eines Blattes weder gleich groß noch besitzen sie dieselbe Form.

Da aber die Sonnenstrahlen als nahezu parallel angesehen werden können, so werden, in geringer Entfernung vom Blatte, die Schatten gleich groß und gleich geformt erscheinen, so wie wir ein dreiseitiges, von der Sonne durchleuchtetes Dreieck in kleiner Entfernung als Dreieck erblicken, während sich das Lichtbild desto mehr in seiner Gestalt ändert, je mehr wir uns mit der Projektionsfläche vom Objekt entfernen.

Ich will auf die im Sonnenlicht erfolgenden Schattenbilder nur insoweit eingehen, als es für das hier behandelte Thema erforderlich ist. Ich habe da auf zweierlei aufmerksam zu machen, was auf die Änderung der Schattenform einwirkt: erstens auf den Umstand, daß in jedem Einschnitt eines Blattes ein (unvollkommenes) Sonnenbild entsteht, wie z. B. in jedem dreiseitigen, von der Sonne durchstrahlten Loche (siehe oben Fig. 3); zweitens, daß mit Entfernung des von der Sonne bestrahlten Blattes oder Blatteiles dasselbe oder dieser Teil desto rascher verschwindet, je mehr man sich mit der Projektionsfläche von dem Blatt entfernt. Wenn ich beispielsweise den Schatten eines gefiederten, mit gestielten Fiederblättchen versehenen Blattes bei Sonnenbeleuchtung in kurzer Distanz betrachte, so sehe ich alle Fiederblätter und den Stiel sowie den gemeinschaftlichen Blattstiel sehr scharf. Entferne ich aber das Blatt von der Projektionsfläche, so verschwinden zuerst die Schatten der Stielchen, sodann der Schatten des gemeinschaftlichen Blattstieles und man sieht nur den Schatten der Fiederblättchen getrennt voneinander in zwei Reihen liegen.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Endlich verschwinden in noch weiterer Entfernung auch diese letzten Schattenreste.

Photographisches Negativ des Schattens eines Ahornblattes. Durch Projektion des Schattens auf photographischem Papier (Entwicklungspapier) erhalten. Die Entfernung des Objektes vom photographischen Papier betrug 5 *mm*.

Fig. 7. (*A*)

Diese beiden Erscheinungen sind an den beistehenden Figuren sehr deutlich ausgeprägt. In diesen Figuren sind zwei

Photographisches Negativ des Schattens desselben Ahornblattes (Fig. 7*A*), in einer Entfernung von 1 *m* aufgenommen. Der Blattstiel ist nicht mehr zu sehen. An Stelle der vier großen Einschnitte erscheinen (unvollständige) Sonnenbilder. Der Blattstiel ist im Schattenbilde nicht mehr wahrzunehmen.

Fig. 8. (*B*)

Schattenbilder eines Ahornblattes zu sehen, von denen das eine (*A*) in der Distanz von wenigen Millimetern, das zweite (*B*)

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

in einer Entfernung von etwa 1 *m* vom Objekt photographisch aufgenommen wurde. *A* hat noch fast ganz genau die Gestalt des Ahornblattes. In *B* hingegen sieht man die (unvollkommenen) Sonnenbilder in jedem Einschnitte (Winkel) des Blattes. Der Blattstiel ist nicht mehr zu sehen.

Durch diese Verhältnisse erklären sich mancherlei bei der im Sonnenlicht erfolgenden Beleuchtung der Pflanzen auftretende Erscheinungen, vor allem die Änderung der Schattenformen der Blätter, welche um so mehr hervortreten, je weiter die Projektionsfläche vom sonnenbestrahlten Blatt entfernt ist, und das partielle Verschwinden der Blatteile im Schatten je nach der Größe.

Es erklärt sich auch die schon oben (p. 784 ff.) erwähnte Entstehung von Sonnenbildern durch Lücken, welche von einem Längsbalken (Teil des gemeinschaftlichen Blattstieles) durchzogen sind.

X. Verteilung der Sonnenbilder im Schattenraume der Laubgewächse.

Die Verteilung der Sonnenbilder im Schattenraume des Laubes erscheint uns gewöhnlich eine regellose zu sein, ist es aber gewiß nicht, da die gesetzmäßige Anordnung der Blätter am Stamm und die innerhalb bestimmter Grenzen regelmäßige Form der Blätter auch zu einer gesetzmäßigen Anordnung der Sonnenbilder führen müssen. Es sind aber doch die Verhältnisse so verwickelt, daß eine regellose Verteilung dem Beobachter entgegenzutreten scheint.

Doch gibt es auch Fälle, in welchen eine auffällige Gesetzmäßigkeit der Anordnung der Sonnenbilder sich einstellt. Diesen Fall finden wir bei gefiederten Blättern ausgeprägt. Hier entsteht, wie wir oben gesehen haben, im Sonnenlicht eine Reihe von Sonnenbildern, welche in ihrer Anordnung der Richtung des gemeinschaftlichen Blattstieles folgen. Durch diese Sonnenbilder werden die unter den dieselben erzeugenden Blättern liegenden Blätter eine Begünstigung der Beleuchtung erfahren und unter sonst gleichen Verhältnissen eine desto größere Begünstigung, je mehr die Richtung der Sonnenstrahlen den

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Verbindungslinien der übereinanderliegenden Blätter entspricht. Wenn die Blätter genau oder nahezu den Stellungsverhältnissen $\frac{2}{5}$ oder $\frac{3}{8}$ entsprechen, wird das fünfte, beziehungsweise das achte unter dem unmittelbar beleuchteten Blatte liegende Blatt von dem verstärkten Lichte der Sonnenbilder Nutzen ziehen können.

Gerade diese Verstärkung der Beleuchtung gedeckter Blätter durch das Licht von Sonnenbildern scheint mir biologisch nicht ohne Bedeutung. Es ist ja leicht einzusehen, daß die Blätter, welche je einen Zyklus der Blattstellung abschließen, die gerade unter ihnen liegenden Blätter am stärksten beschatten müssen, ihnen also das meiste Licht entziehen. Also beispielsweise bei der $\frac{3}{8}$-Stellung wird das achte Blatt, das über dem ersten (richtiger nullten) steht, dieses letztere am meisten beschatten. Da nun auf das Anfangsblatt des Zyklus die durch das achte Blatt entstandenen Sonnenbilder auffallen, so wird jedenfalls dieses Anfangsblatt stärker als jedes andere desselben Zyklus beleuchtet sein, und so kann man annehmen, daß der Nachteil stärkster Beschattung durch die von den Sonnenbildern ausgehende Beleuchtung aufgehoben wird.

XI. Eindringen des diffusen Tages- und des direkten Sonnenlichtes in die Laubmasse durch geschlossene, im Laube befindliche Lücken.

Nimmt man an, daß die Strahlen des direkten Sonnenlichtes völlig parallel und die des diffusen Lichtes nach unendlich vielen Richtungen laufen, so kann man sich rasch eine Vorstellung bilden über die unterhalb einer geschlossenen Lücke erfolgende Beleuchtung einer Fläche.

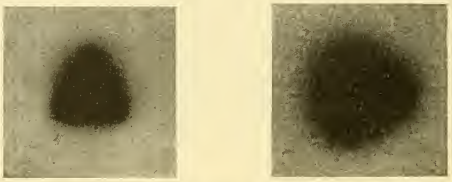
Da aber die Strahlen des Sonnenlichtes keine genau parallele Richtung einschlagen, so ergeben sich Besonderheiten der Beleuchtungsverhältnisse, welche ich oben schon, für unseren Zweck mit entsprechender Genauigkeit, erörtert habe. Wir haben insbesondere die Beleuchtung des Laubes und des beschatteten Vegetationsbodens durch Sonnenbilder, ferner die Eigentümlichkeit der durch Sonnenlicht hervorgerufenen

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Schatten der Blätter kennen gelernt. Auf die im Laube erfolgende Umwandlung des direkten Sonnenlichtes in diffuses Tageslicht wird weiter unten noch einzugehen sein.

Um nun auch eine auf Anschauung beruhende Vorstellung darüber zu gewinnen, wie die faktische Beleuchtung der Flächen beschaffen ist, wenn das auf diese einwirkende diffuse Licht durch geschlossene Lücken hindurchgeht, habe ich folgende Versuche angestellt.

Holzkästchen von verschiedener Tiefe wurden oben durch eine dünne Platte, in welche je ein gleichseitiges Dreieck von



A *B*

Fig. 9.

Bei *A* betrug die Entfernung zwischen der dreieckigen Lücke und dem photographischen Papier 1 *mm*, bei *B* 4 *mm*.

von 1 *cm* Seitenlänge eingeschnitten war, vollkommen lichtdicht verschlossen. Am Boden jedes Kästchens war photographisches Papier ausgespannt. In den einzelnen Kästchen betrug die Entfernung der dreiseitigen Lücke vom Boden 1, 4, 8, 12, 16 und 20 *mm*. Die so adjustierten Kästchen wurden im diffusen Tageslichte frei exponiert, und zwar dem Oberlicht ausgesetzt.

Es wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, die beiläufig dieselben Resultate ergaben. Ich teile eine dieser Versuchsreihen mit, welche am 20. März 1909 zwischen $9^h\ 45^m$ und $11^h\ 30^m$ a. m. ausgeführt wurde. Der Himmel war vollkommen bedeckt ($B_0 S_0$). Die Intensität des gesamten Tageslichtes betrug, in Bunsen-Roscoe'schem Maß ausgedrückt, 0·138 bis 0·245.

Ich bemerke zunächst, daß die reine Dreiecksform der im Lichte sich schwärzenden Fläche nur erhalten blieb, wenn die

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Entfernung der Lücke vom photographischen Papier = 0 war. Schon bei einer Entfernung von 1 *mm* erscheint die Fläche im Vergleich zum Dreieck bereits vergrößert und umgestaltet: die Seitenlänge beträgt bereits etwa 15 *mm*, die Seiten des Dreiecks erscheinen abgerundet, desgleichen die Ecken (Fig. 9, *A*).

In einer Entfernung von 4 *mm* ist die bestrahlte Fläche bereits vollständig abgerundet, es ist also die Dreiecksform nicht mehr zu erkennen (siehe Fig. 9, *B*).

Wie Fig. 9, nur betrug die Entfernung zwischen der dreieckigen Lücke und dem photographischen Papier 8 *mm*.

Fig. 10.

Bei weiter wachsenden Entfernungen ist die beleuchtete Fläche schon kreisförmig (Fig. 10). Die Grenzen der Kreisfläche sind nicht genau zu bestimmen, da die Lichtstärke der beleuchteten Kreisfläche ganz allmählich abnimmt und endlich verschwindet. Doch läßt sich approximativ der Durchmesser (*D*) der Kreisfläche bei den einzelnen Entfernungen (*E*) bestimmen. Unter den genannten Beleuchtungsverhältnissen ergaben sich folgende Werte für die Durchmesser der Kreisfläche:

E	*D*
4 *mm*	28 *mm*
8	39
12	50
16	62
20	73

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Aus diesen und anderen ähnlichen Versuchen ist zu ersehen, wie rasch mit Zunahme der Entfernung der Lücke von der Projektionsfläche die durch eine dreiseitige Lücke sich ergebende Beleuchtungsfläche die Kreisgestalt annimmt und wie rasch diese Fläche mit der Entfernung von der Lücke wächst.

Wie verschieden die Wirkung des direkten und diffusen Lichtes sich gestaltet, wenn dasselbe durch ein und dieselbe Lücke durchtritt, ist aus nachstehender Abbildung zu ersehen (Fig. 11).

Fig. 11.

Photographie, entstanden in einer lichtdichten Holzkassette durch die Wirkung von diffusem Tageslicht (Zenitlicht). Das Licht ging durch ein gleichseitiges Dreieck von 1 *cm* Seitenlänge hindurch. Am Schlusse des Versuches wirkte durch einige Sekunden direktes Sonnenlicht, durch welches das dunkle Dreieck zustande kam. Die Entfernung der dreiseitigen Lücke vom photographischen Papier betrug 20 *mm*.

20. März 1908,
$9^h\,45^m$ bis $11^h\,30^m$,
$I = 0{\cdot}138$ bis $0{\cdot}245$.

Es wurde in ein Kästchen in einer Entfernung von 20 *mm* das Licht auf das photographische Papier zur Einwirkung gebracht, und zwar wie in der vorigen Versuchsreihe. Aber auf kurze Zeit wurde nachträglich direktes Sonnenlicht durch das dreiseitige Loch geleitet, wobei sich das Dreieck scharf abbildete. Dem Sonnenstand entsprechend kam dieses Dreieck exzentrisch zur Kreisfläche, welche durch die diffuse Beleuchtung hervorgerufen wurde, zu liegen. Das durch das direkte Sonnenlicht erzeugte Bild des Dreiecks hatte fast genau dieselbe Größe wie das die Lücke bildende Dreieck. Vergleicht man diese Dreiecksfläche, welche durch das direkte Sonnenlicht, mit jener Kreisfläche, welche durch das diffuse Licht hervorgerufen wurde, so ergibt sich, daß die letztere Fläche

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

beiläufig 95mal größer ist als die erstere, woraus zu ersehen ist, wie weit selbst bei kleiner Entfernung das durch die Lücke gegangene diffuse Licht im Vergleiche zum durch dieselbe Lücke gegangenen direkten Lichte sich unterhalb der Lücke ausbreitet.

Daß die Lichtstärke des einstrahlenden diffusen Lichtes desto mehr abnimmt, je größer die Entfernung ist, in welcher dieses Licht zur Wirkung kommt, ist selbstverständlich und kommt in den Tönen der abgebildeten Photographien zur Geltung (Fig. 9 bis 11). Aber diese Photographien lehren auch, wie die Intensität der Strahlung gegen die Peripherie abnimmt. Diese Intensitätsabnahme ist ganz verständlich: je schiefer die Strahlen des diffusen Lichtes einfallen, desto schwächer ist ihre Wirkung. Da die Strahlen des diffusen Lichtes unendlich viele Richtungen einschlagen, so kann die Beleuchtung der fraglichen Fläche keine an allen Punkten gleiche sein, und da die Lichtstärke vom Zenit gegen den Horizont abnimmt, so muß die Beleuchtungsstärke im kreisförmigen Himmelsbilde vom Zentrum gegen die Peripherie abnehmen. Es ergibt sich bezüglich der Relation von Entfernung und Lichtstärke schon in unserem einfachen Fall eine große Komplikation. Im Laube der Gewächse wächst aber diese Komplikation noch mehr, da das durch die Lücke gehende Licht im Laube nicht wie in unserem Experiment in einen dunklen Raum, sondern in einen diffus beleuchteten Raum einstrahlt. Immerhin lehren aber die mitgeteilten Versuche und die an dieselben geknüpften Erörterungen, wie weit im Vergleiche zum direkten Lichte das diffuse durch Lücken in das Laub eintretende Licht im Laube sich ausbreitet.

XII. Spezielle Beobachtungen über die Lichtstärke der Sonnenbilder.

In den letzten zwei Jahren habe ich zahlreiche messende Versuche über die Lichtstärke der Sonnenbilder im Vergleiche zur Intensität des Gesamtlichtes, der direkten Sonnenstrahlung und der Lichtstärke des Schattens, in welchem diese Sonnenbilder entstanden sind, angestellt.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Ich wähle aus der großen Zahl meiner Beobachtungen einige charakteristische Fälle und stelle dieselben im nachfolgenden zusammen.

In den nachfolgenden Zusammenstellungen ist die Himmelsbedeckung (B_0 etc.) in üblicher Weise angeführt, der Grad der Sonnenbedeckung, wie ich dies in meinen lichtklimatischen und den Lichtgenuß betreffenden Arbeiten stets zu tun pflegte, in fünf Graden ausgedrückt, wobei S_0 völlig bedeckte, S_4 völlig unbedeckt erscheinende Sonne bedeutet.

Es bedeutet ferner:

I_{d+s} die Intensität der Gesamtstrahlung,
I_d die Intensität des gesamten diffusen Tageslichtes,
I_s die Intensität der direkten Sonnenstrahlen,
$I_{\hat{s}+s}$ die Lichtstärke des Sonnenbildes,
$I_{\hat{s}}$ die Lichtstärke des Schattens, in welchem das Sonnenbild entstanden ist,
I_s die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes.
D Durchmesser des Sonnenbildes.

Alle Intensitätsbestimmungen erfolgten nach der von mir angegebenen und in meinen Schriften über Lichtgenuß und Lichtklima genau beschriebenen Methode.

Versuche mit Aesculus hippocastanum.

I.

Schönbrunn bei Wien. 29. Juni 1907. 9^h a. $B_0 S_4$.
$D = 2\ cm$.

$I_{d+s} = 0{\cdot}843$	$I_{\hat{s}+s} = 0{\cdot}138$
$I_d = 0{\cdot}411$	$I_{\hat{s}} = 0{\cdot}025$
$I_s = 0{\cdot}432$	$I_s = 0{\cdot}113$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit etwa $^1/_{7{\cdot}4}$ der Stärke der Gesamtstrahlung, $^1/_{3{\cdot}8}$ der direkten Strahlung und $^1/_{3{\cdot}7}$ der Intensität des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist 4·5mal so groß als die des Schattenlichtes.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biolo

II.

Baden bei Wien. 30. Juli 1908. 12^h m. $B_0 S_4$.
$D = 3\ cm.$

$$I_{d+s} = 1 \cdot 000 \qquad I_{\delta+\sigma} = 0 \cdot 182$$
$$I_d = 0 \cdot 488 \qquad I_\delta = 0 \cdot 045$$
$$I_s = 0 \cdot 512 \qquad I_\sigma = 0 \cdot 137$$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit etwa $^1/_{7 \cdot 3}$ der Stärke des Gesamtlichtes, $^1/_{3 \cdot 7}$ der Stärke des direkten Sonnenlichtes und $^1/_{3 \cdot 5}$ der Stärke des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist etwa dreimal so stark als die des Schattenlichtes.

III.

Baden bei Wien. 5. August 1908. 11^h a. $B_0 S_4$.
$D = 6\ cm.$

$$I_{d+s} = 1 \cdot 100 \qquad I_{\delta+\sigma} = 0 \cdot 141$$
$$I_d = 0 \cdot 305 \qquad I_\delta = 0 \cdot 087$$
$$I_s = 0 \cdot 795 \qquad I_\sigma = 0 \cdot 054$$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit etwa $^1/_{20}$ der Stärke des Gesamtlichtes, $^1/_{14}$ der Stärke des direkten Sonnenlichtes und $^1/_{5 \cdot 6}$ der Stärke des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist bloß 1·6mal so groß als die des Schattenlichtes.

Versuche mit einer sommergrünen Eiche.

Abbazia. 9. September 1908. 11^h a. $B_0 S_4$.
$D = 8\ cm.$

$$I_{s+d} = 1 \cdot 275 \qquad I_{\delta+\sigma} = 0 \cdot 122$$
$$I_d = 0 \cdot 550 \qquad I_\delta = 0 \cdot 073$$
$$I_s = 0 \cdot 725 \qquad I_\sigma = 0 \cdot 049$$

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit etwa $^1/_{26}$ der Stärke der Gesamtstrahlung, $^1/_{14}$ der Stärke der direkten Strahlung und $^1/_{11}$ der Intensität des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt nur $^1/_{1\cdot4}$ des Schattenlichtes.

Versuche mit Laurus nobilis.

I.

Abbazia. 7. September 1908. 11^h a. $B_0 S_4$.
$D = 3\cdot5\ cm.$

$I_{d+s} = 1\cdot100$ $\quad$ $I_{i+z} = 0\cdot112$
$I_d = 0\cdot550$ $\quad$ $I_i = 0\cdot014$
$I_s = 0\cdot550$ $\quad$ $I_z = 0\cdot098$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit nahezu $^1/_{11}$ der Gesamtstrahlung, $^1/_{5\cdot6}$ der direkten Strahlung und $^1/_{5\cdot6}$ der Stärke des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist 7mal so stark als die des Schattenlichtes.

Es wurde die Temperatur im Lorbeerschatten mit der Lufttemperatur an der Sonne und mit der Temperatur im Sonnenbilde mittels eines gewöhnlichen Thermometers verglichen, wobei sich folgendes Verhältnis ergab: 21·8 : 27·7 : 24·4.

II.

Abbazia. 20. September 1908. 1^h p. $B_0 S_4$.
$D = 10\ cm.$

$I_{d+s}{}^* = 0\cdot686$ $\quad$ $I_{i+z} = 0\cdot072$
$I_d{}^* = 0\cdot239$ $\quad$ $I_i = 0\cdot027$
$I_s = 0\cdot447$ $\quad$ $I_z = 0\cdot045$

* Es strahlte nicht der ganze Himmel, sondern nur etwa ein Drittel desselben ein.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit etwa $^1/_{15}$ der disponiblen Gesamtstrahlung, $^1/_{9\cdot9}$ der direkten Strahlung und $^1/_{5\cdot3}$ der Stärke des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist beiläufig 1·6mal stärker als die des Schattenlichtes.

Versuch mit Viburnum tinus.

Abbazia, 9. September 1908. $9^h\,15^m$ a. B_0S_4.
$D = 1\cdot2\ cm.$

$$I_{d+s} = 0\cdot834 \qquad I_{\delta+\sigma} = 0\cdot114$$
$$I_d = 0\cdot456 \qquad I_\delta = 0\cdot046$$
$$I_s = 0\cdot378 \qquad I_\sigma = 0\cdot068$$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit nahezu $^1/_{12}$ der Gesamtstrahlung, $^1/_{5\cdot5}$ der direkten Strahlung und $^1/_{6\cdot7}$ der Stärke des diffusen Lichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist beiläufig 1·5mal so groß als die des Schattenlichtes.

Versuch mit Selaginella cuspidata.

I.

Wien. An einem Südfenster. Datum ? 11^h a. S_4B_0.
$D = 3\cdot5\ mm.$

$$I_{d+s} = 0\cdot522\,^* \qquad I_{\delta+\sigma} = 0\cdot328$$
$$I_d = 0\cdot058\,^* \qquad I_\delta = 0\cdot030$$
$$I_s = 0\cdot464 \qquad I_\sigma = 0\cdot298$$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist somit nahezu $^1/_{1\cdot7}$ der Gesamtstrahlung, $^1/_{1\cdot5}$ der direkten Strahlung und beträgt das 5·1fache der Lichtstärke des diffusen Tageslichtes.

---

* Am Beobachtungsorte. Die Intensität entspricht also nicht dem gesamten Tageslichte.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist beiläufig 10mal so groß als die des Schattenlichtes.

II.

Wien. An einem Ostfenster. 20. April 1909. 10^h a. $B_3 S_3$. $D = 3 \cdot 5$ *mm*.

$I_{d+s}{}^* = 0 \cdot 405$	$I_{h+s} = 0 \cdot 258$
$I_d{}^* = 0 \cdot 134$	$I_h = 0 \cdot 079$
$I_s = 0 \cdot 221$	$I_s = 0 \cdot 179$

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes beträgt somit nahezu $^1/_{2 \cdot 2}$ der Gesamtstrahlung, $^1/_{1 \cdot 5}$ der direkten Strahlung und ist etwa 1·3mal so groß wie die Lichtstärke des diffusen Tageslichtes.

Die Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes ist beiläufig 2·3mal so groß als die des Schattenlichtes.

Die vorgeführten Beobachtungsresultate, welche sich auf das für die Pflanze so wichtige Verhältnis der Intensität der direkten Strahlung des Sonnenbildes zur Intensität des Schattenlichtes der betreffenden Pflanze beziehen, werden wohl nach den früheren Darlegungen über Zustandekommen und Eigenschaften der Sonnenbilder verständlich sein. Man sieht, wie im großen ganzen die Lichtstärke des Sonnenbildes mit der Zunahme der Größe des letzteren abnimmt. Der auf *Viburnum tinus* Bezug nehmende Fall ist deshalb interessant, weil er zeigt, daß selbst bei kleinem Durchmesser des Sonnenbildes dessen Lichtstärke eine geringe sein kann; offenbar waren die Lücken, durch welche die Sonnenbilder hervorgerufen wurden, sehr klein. Die beiden auf *Selaginella* bezüglichen Fälle habe ich besonders ausgewählt, weil sie lehren, wie selbst bei gleichem Durchmesser des Sonnenbildes die Intensitäten der direkten Strahlung des Sonnenbildes weit

* Am Beobachtungsorte. Die Intensität entspricht also nicht dem gesamten Tageslichte.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

auseinanderliegen können. Nicht nur die ungleiche Größe der Lücken, sondern auch die Beleuchtungsverhältnisse sind Ursache der großen Verschiedenheit in der Stärke der direkten Strahlung der Sonnenbilder im Vergleiche zur Stärke des Schattenlichtes.

XIII. Veränderung der Lichtstärke durch »unsichtbare Schatten«. Umwandlung des direkten Sonnenlichtes innerhalb des Laubes und der Gewebe in zerstreutes Licht.

Es wurde schon oben auseinandergesetzt, daß bei direkter Bestrahlung eines gefiederten Blattes mit der Entfernung der schattenauffangenden Fläche von dem Blatte zuerst die Schatten der Blattstiele, sodann der Schatten des gemeinschaftlichen Blattstieles und endlich die Schatten der Blättchen verschwinden.

Es wurde auch gezeigt, daß Lücken im Laube, welche von Stücken des gemeinschaftlichen Blattstieles wie von einem Balken durchzogen erscheinen, trotzdem reine Sonnenbilder liefern, natürlich in Entfernungen, in welchen die Schatten dieser Balken nicht mehr sichtbar sind und den Gang der Sonnenstrahlen nicht zu hindern vermögen.

Ich nenne solche nicht mehr nachweisbare Schatten von Blättern und Blatteilen der Einfachheit halber »unsichtbare Schatten«.

Diese »unsichtbaren Schatten« erklären eine von mir aufgefundene Tatsache, welche mir anfangs ganz unverständlich war. Wenn die Sonne in breiten Lücken in das Laub einstrahlt, so ist die Intensität des direkten Sonnenlichtes dieselbe wie jene des direkten Sonnenlichtes, welches ganz ungehindert die Peripherie der Laubkrone bestrahlt. Nun habe ich mehrmals die Beobachtung gemacht, daß im Baumschatten liegende große, unbestimmt geformte Lichtflecke eine Intensität des direkten Sonnenlichtes aufweisen, welche geringer ist als die des direkten Sonnenlichtes auf völlig frei exponiertem Standort und daß sich auch eine schwache Erhöhung der Stärke des diffusen Schattenlichtes einstellt. Wie ich später gefunden habe, wird diese Erscheinung durch »unsichtbare Schatten«

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

hervorgerufen, welche im allgemeinen die Lichtstärke eines solchen »Lichtfleckes« herabsetzen und einerseits eine Verminderung der Stärke des direkten Sonnenlichtes und andrerseits eine (schwache) Erhöhung der Intensität des dem »Lichtfleck« angehörigen diffusen Lichtes herbeiführt.

Aus meinen diesbezüglichen Beobachtungen hebe ich den folgenden Fall hervor.

Am 5. August 1908 beobachtete ich eine Intensität des direkten Sonnenlichtes $= 0{\cdot}393$ (Baden bei Wien) um $9^h\,10^m$ bei $B_2 S_4$.

$$I_{d+s} = 0{\cdot}795$$
$$I_d = 0{\cdot}402$$
$$I_s = 0{\cdot}393$$

Im Schatten einer Roßkastanie bemerkte ich einen etwa 900 cm^2 großen Lichtfleck von anscheinend gleichmäßiger starker Beleuchtung. Die Intensität des direkten Lichtes dieses Sonnenbildes betrug aber nicht $0{\cdot}393$, sondern bloß $0{\cdot}302$. Die Lichtstärke der direkten Strahlung erscheint also im Lichtfleck um $0{\cdot}091$ gesunken. Hingegen hatte sich die Stärke des diffusen Lichtes im Bereiche des »Lichtfleckes« um $0{\cdot}025$ erhöht, was konstatiert werden konnte, nachdem jene Blätter, welche den »unsichtbaren Schatten« geworfen hatten, entfernt wurden.

Zur weiteren Feststellung des Sachverhaltes wurde folgender Versuch über den Einfluß des »unsichtbaren Schattens« auf die Beleuchtungsverhältnisse der Pflanzenorgane auf meine Veranlassung von Herrn Dr. V. Vouk im pflanzenphysiologischen Institut angestellt. Es wurde ein Stock von *Asparagus plumosus* am 24. April um 9^h a. bei $B_0 S_4$ an einem Ostfenster aufgestellt. Der den Schatten auffangende Schirm wurde nur so weit von dieser Pflanze (deren Höhe 77, deren Breite 36 *cm* betrug) entfernt, bis die Schatten der zarten, mit haardünnen Phyllokladien besetzten Zweige fast gänzlich verschwunden waren. Die Entfernung der Pflanze vom Schirm betrug 450 *cm*. Im »unsichtbaren Schatten« war die Intensität des direkten Sonnenlichtes $0{\cdot}318$, die des diffusen Lichtes $= 0{\cdot}062$. Hingegen war nach Entfernung der Pflanze die Intensität des direkten Sonnenlichtes $0{\cdot}357$, die des diffusen Lichtes $0{\cdot}042$.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die Sonnenstärke hatte also in diesem Versuch infolge der Wirkung des »unsichtbaren Schattens« um 0·039 abgenommen, hingegen die Stärke des diffusen Lichtes um 0·020 zugenommen.[1]

Es wurden mit dieser Pflanze noch mehrere ähnliche Versuche vorgenommen, die mit den angeführten gleichsinnige Resultate ergaben.

Es findet also zweifellos im Laube der Pflanze eine Lichtzerstreuung statt, welche eine Verminderung der Stärke des direkten Sonnenlichtes und eine Erhöhung der Stärke der diffusen Strahlung herbeiführt.

Aus diesem Versuch ist aber auch zu ersehen, daß die Stärke des diffusen Lichtes der Baumkrone nicht nur abhängig ist von dem einstrahlenden Himmelslicht, sondern daß in dem Laube selbst eine Zerstreuung des eintretenden Sonnenlichtes sich einstellt, welche zu einer Vermehrung des diffusen Lichtes führt.

Bei großblättrigen Pflanzen wird diese Vermehrung des diffusen Lichtes wenig austragen. Sie wird im allgemeinen desto mehr betragen, je kleiner die Blätter sind, und bis zu einer bestimmten Grenze, je zahlreicher die Blätter auftreten. Je weiter also die Blattzerteilung geht, sei es durch Fiederung oder durch Kleinerwerden der einfachen Blätter, desto mehr wird natürlich bis zu einer bestimmten Grenze die Umwandlung des direkten Sonnenlichtes in diffuses innerhalb des Laubes fortschreiten.

Wie ich an anderer Stelle[2] gezeigt habe, wächst der Lichtgenuß der Pflanzen mit fortschreitender Blattzerteilung. Diese weitreichende Blattzerteilung bietet der besonnten Pflanze, wie ich dort nachwies, den Vorteil eines auffällig großen Wärmeschutzes und, wie ich oben zeigte, den nicht minder großen Vorteil einer Umwandlung in diffuses Licht, welches ja in der Regel der Pflanze zuträglicher ist als das direkte Sonnenlicht.

[1] Dabei wurde die Abschwächung des diffusen Lichtes infolge Duchganges durch die (überaus zarte) Belaubung der Pflanze nicht berücksichtigt.

[2] Über Blattgestalt und Lichtgenuß siehe oben p. 759.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Daß dieses letztere beim Durchtritte durch die Pflanzenorgane (z. B. durch die Blattsubstanz) eine weitere Umwandlung in diffuses Licht zur Folge hat, sei hier auch noch angemerkt. Diese Umwandlung von direktem Sonnenlicht in diffuses erfolgt durch Zerstreuung. Wenn man beachtet, daß sowohl die Membran als auch das Protoplasma und der Zellkern so wie die anderen Inhaltskörper der Zelle aus Teilchen bestehen, die in der Lichtbrechung voneinander abweichen, so wird es klar werden, daß innerhalb der Gewebe der Pflanzen eine weitgehende Lichtzerstreuung und dementsprechend eine Vermehrung des diffusen Lichtes stattfinden muß.

Diese Lichtzerstreuung im Innern der Gewebe schließt eine nutzlose Durchstrahlung aus, bewirkt vielmehr, daß der Weg, den das auffallende Licht in der Zelle oder in den Geweben zurückzulegen hat, verlängert und das Licht zu größerer Leistung innerhalb der Pflanzenorgane herangezogen wird.

XIV. Übersicht über die Veränderungen des Außenlichtes innerhalb des Laubes.

Die frei exponierten Pflanzen sind, soweit die Organe derselben sich nicht selbst beschatten, der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt. An welchen Örtlichkeiten (nach Breite und Seehöhe) die direkte Sonnenbeleuchtung zu größerer Wirkung gelangt, ist oben schon erwähnt worden. Im allgemeinen kann man auch sagen, daß im Frühling und Herbst, also bei relativ geringer Lichtstärke, die förderliche Wirkung des direkten Sonnenlichtes eine größere ist als im Sommer. Es ist auch verständlich, daß die im Laufe der Entwicklung sich ergebende, im Vergleich zur vollkommenen Ausbildung noch relativ geringere Laubmasse und die infolge des »Sommerlaubfalles«[1] sich gegen den Herbst zu vollziehende Reduktion der Blätterzahl der Holzgewächse die Bestrahlung durch direktes Licht begünstigen muß, während in der Zeit der vollen Belaubung infolge vermehrter Lichtzerstreuung eine Vermehrung des diffusen Lichtes sich einstellen wird. Da aber zur Zeit der

[1] Wiesner, Ber. D. Bot. Ges., Bd. XXII (1904).

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

vollen Belaubung der Eintritt des äußeren diffusen Lichtes eine Einschränkung erfährt, so erscheint die Vermehrung des letzteren durch Umwandlung aus direktem als eine Kompensation.

Ebenso kann man es als Regel betrachten, daß bei starker direkter Bestrahlung die Pflanze gegen das Übermaß der Beleuchtung sich wehrt. Dabei sind, wie die Erscheinung des »Hitzelaubfalles«[1] lehrt, die peripher gelegenen Blattorgane wegen der großen Ausstrahlung der Blätter gegen den Himmel im Vorteil gegenüber den ebenso stark bestrahlten, aber in nach oben offenen Lücken gelegenen Blättern der Baumkrone.

Die Laubknospen der Nadelhölzer und überhaupt der immergrünen Holzgewächse liegen peripher und sind deshalb der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt. Da aber die Blattentwicklung in den Frühling fällt, wenn die Intensität des Sonnenlichtes noch nicht hoch ist, so hat die direkte Sonnenwirkung bei der ersten Laubentwicklung eine für die Pflanze nützliche Wirkung. Ein gleiches gilt auch für die sommergrünen Holzgewächse, deren Laubknospen aber zum Teil gegen die Peripherie nicht so vorgeschoben sind wie die der immergrünen Holzgewächse. Aber selbst wenn diese Knospen auch tiefer in die Krone hineinreichen, so erfolgt doch die Laubentwicklung aus diesen Knospen in der Zeit, in welcher diese Bäume oder Sträucher noch unbelaubt sind. Es sind deshalb auch diese Knospen der Bestrahlung durch direktes Sonnenlicht ausgesetzt und aus schon angeführten Gründen kommt den sommergrünen Holzgewächsen die direkte Sonnenwirkung ebenso zugute wie den wintergrünen. Die Bedeckung all dieser Laubknospen mit Tegmenten (Knospendecken) der verschiedensten Art ist wohl fast ausschließlich als Schutzeinrichtung während der Winterruhe zu deuten; als Schutz gegen zu starke Lichtwirkung bei Beginn der Laubentwicklung dürften diese Organe nicht oder nur in sehr untergeordnetem Maße dienen.

Die Regulierung des Lichtgenusses der Pflanze erfolgt auf die mannigfaltigste Weise und, wie ich früher

[1] Siehe oben p. 761.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

ausführlich auseinandersetzte, sowohl durch die Wahl des Standortes als durch die Selbstbeschattung, wobei es hauptsächlich der Pflanze darauf ankommt, sich ein bestimmtes Ausmaß von diffusem Licht zu sichern.

Es greift aber auch, wie in diesen Blättern gezeigt wurde, das direkte Sonnenlicht in den Prozeß der Regulierung des Lichtgenusses insoferne ein, als dasselbe durch die bei der Entstehung der Sonnenbilder zustande kommende Verminderung der Lichtstärke der Pflanze gerade jenes Licht zuführt, welches für sie am vorteilhaftesten ist. In gleichem Sinn ist für die Pflanze die in ihrer Laubmasse erfolgende Umsetzung von direktem in zerstreutes Licht von Vorteil.

Bei der Regulierung des Lichtgenusses ist auch das in das Laub eindringende direkte Sonnenlicht beteiligt. Da die Laubzerteilung (siehe oben p. 805) der Pflanze nicht nur den Vorteil eines sehr weitreichenden Wärmeschutzes gewährt, sondern auch die Umwandlung des direkten Sonnenlichtes in das für die Pflanze vorteilhaftere zerstreute Licht bewirkt, so ist einzusehen, daß dieser Umsatz von direktem Licht in zerstreutes der Pflanze desto mehr zugute kommen wird, je weiter die Laubzerteilung reicht und je größer die Blattzahl wird, letzteres aber, theoretisch genommen, nur bis zu einer bestimmten Grenze. Diese Grenze wird aber von der Pflanze nicht überschritten: nie wird eine weitgehende Blattzerteilung mit einer so großen Vermehrung der Blattzahl verbunden sein, daß die Vorteile der Zerteilung durch eine Überzahl von Blättern aufgehoben werden würde.

Die Umwandlung des direkten Sonnenlichtes in diffuses innerhalb der Laubmasse der Pflanzen wird, wie schon angedeutet, in der Zeit ihrer vollständigsten Entwicklung am größten sein, weil hier die Oberfläche der gesamten Blattmasse ihr Maximum erreicht; vorher ist sie infolge der Evolution kleiner, desgleichen z. B. infolge des Sommerlaubfalles in der Periode der Involution. Bei jenen zahlreichen Holzgewächsen, bei welchen die Entwicklung des Laubes in das Frühjahr, die Entlaubung in den Herbst fällt, also das Maximum der Laubmasse in den Sommer, nämlich in die Zeit der stärksten Sonnenbeleuchtung, wird der durch die vermehrte Laubmasse

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

verminderte Zutritt von diffusem Außenlicht durch vermehrten Umsatz von direktem Licht in diffuses kompensiert.

Dieser Umsatz von direktem Licht in diffuses ist nur einer von den zahllosen Behelfen,[1] deren die Pflanze sich bedient, um ihren Lichtgenuß zu regulieren. Er gilt nur für Gewächse, deren Blätterzahl einem Wechsel im Lauf einer Vegetationsperiode unterworfen ist, also vor allem für die sommergrünen Holzgewächse in höherem Maß als für die immergrünen. Er kann für die nicht ganz geringe Zahl von Pflanzen mit geringer und konstanter Blattzahl (z. B. für die ein-, zwei-, drei-, vierblättrigen etc.) keine Geltung haben. Der Lichtgenuß dieser Pflanzen wird in zum Teil anderer Weise geregelt, aber auch wieder in verschiedener Weise, je nachdem sie auf ganz frei exponierten Standorten vorkommen, wie z. B. die meisten Annuellen, oder ob sie Schattenpflanzen sind.[2] Im ersteren Falle liegt ihr Lichtgenuß ausschließlich innerhalb jener Grenzen, welche durch das ungehemmte äußere Licht gegeben sind. Im letzteren Fall, also bei Schattenpflanzen, erfolgt aber die Regulierung durch den Lichtgenuß jener Gewächse, in deren Schatten sie auftreten. Daß bei diesen Gewächsen ein Lichtzuschuß durch Sonnenbilder erfolgt, welche auf den Boden und auf die Bodenpflanzen sich projizieren, habe ich schon früher betont.[3]

---

1 »Lichtgenuß«, p. 251 ff.

2 »Lichtgenuß«, p. 256.

3 p. 779, s. auch »Lichtgenuß«, p. 167.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Zusammenfassung der wichtigeren Resultate.

Wenn auch das diffuse Tageslicht, dem sich die Pflanze am Tage nie entziehen kann, im Haushalte der Pflanze eine weitaus größere Rolle spielt als das direkte Sonnenlicht, welches niemals die Pflanze als solches, sondern immer nur gemischt mit diffusem Licht die Pflanze trifft, so hat diese sich dem direkten Sonnenlicht ebenso wie dem diffusen Tageslicht angepaßt: sei es, daß sie durch die verschiedensten Schutzeinrichtungen die übermäßige Wirkung abwehrt, sei es, daß sie in kalten Erdgebieten oder in kalten Abschnitten der Vegetationsperioden das Sonnenlicht zu stärkerer Leistung heranzieht oder endlich, daß sie sich so gestaltet, daß ihr nur geschwächtes Sonnenlicht von außen zufließt. Alle diese Verhältnisse wurden in früheren Abhandlungen des Verfassers erörtert und kommen in den vorangegangenen Blättern nur summarisch zur Sprache.

Die Aufgabe, welche in dieser Abhandlung zu lösen versucht wurde, besteht darin, zu zeigen, daß das Laub der Pflanze die Stärke des direkten Sonnenlichtes in einer für das Gedeihen der Pflanze zweckmäßigen Weise herabsetzt. Es geschieht dies auf zweierlei Weise; erstlich durch die Erzeugung von Sonnenbildern, welche sich auf die Blätter projizieren, und zweitens durch eine im Laube vor sich gehende Lichtzerstreuung.

Die Sonnenbilder werden beim Durchgang des Sonnenlichtes durch im Laube befindliche Lücken gebildet. Über der Lücke hat das direkte Sonnenlicht seine spezifische Stärke; von der Lücke an nach abwärts nimmt die Lichtstärke angenähert im umgekehrt quadratischen Verhältnis der Entfernung ab. Je kleiner die Lücke ist, desto genauer ist das Gesetz erfüllt. Strahlt das Sonnenlicht in Lücken ein, welche die Bildung von Sonnenbildern nicht mehr zulassen, so pflanzt es sich nach unten mit gleicher Lichtstärke fort.

Punktförmige Lücken rufen Sonnenbilder hervor, welche auf ihrer ganzen Fläche eine gleiche Lichtstärke aufweisen. Größere Lücken erzeugen Sonnenbilder mit nach außen abnehmender Lichtstärke. Punktförmige Lücken bringen Sonnen-

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

bilder hervor, deren Durchmesser *(D)* sich aus der Entfernung *(E)* von der Lücke leicht berechnen läßt:

$$D = E.0{\cdot}0093.$$

Sonnenbilder, welche durch meßbare Lücken entstehen, erscheinen um die Breite der Lücke vergrößert.

Ein Blatt, welches über einem anderen steht (z. B. bei $\frac{3}{8}$ das Blatt 8 über 0), entzieht letzterem die größte Menge des diffusen Lichtes. Die Pflanze kompensiert, wenn sie größere Blätter erzeugt, diesen Nachteil durch Fiederung der Blätter; infolgedessen wird bei Sonnenbeleuchtung gerade das untere Blatt durch Sonnenbilder relativ stark beleuchtet.

Im Laufe der Entwicklung des Laubes eines sommergrünen Holzgewächses wird zur Zeit der stärksten Belaubung der Zutritt des äußeren diffusen Lichtes am meisten gehemmt, aber zu dieser Zeit erfolgt auch der stärkste Umsatz von direktem Sonnenlicht durch das Laub in diffuses Licht.

So wird also durch das Laub selbst die Stärke des Lichtes in einer für die Pflanze zweckmäßigen Weise reguliert.

Diese Regulierung gilt aber nur für Gewächse mit einer größeren unbestimmten Anzahl von Blättern.

Ist die Zahl klein und bestimmt, z. B. bei konstant ein-, zwei-, drei-, vierblättrigen Pflanzen, so wird deren Lichtgenuß, sofern sie Schattenpflanzen sind, von den Gewächsen, in deren Schatten sie leben, reguliert; wenn sie aber frei exponiert sind, so liegt ihr Lichtgenuß lediglich innerhalb jener Grenzen, welche durch das ungehemmt zutretende äußere Licht gegeben ist. Ihr Lichtgenuß weicht dann, wie bei den meisten Annuellen, von dem maximalen Wert ($L = 1$) nicht oder nur wenig ab.

Beim Eintritt des Sonnenlichtes in die Zellen und Gewebe wird ein Teil desselben notwendigerweise in zerstreutes umgewandelt; innerhalb der Zelle schon deshalb, weil die Bestandteile der Zellen (Membran, Protoplasma und Kern) aus Teilchen von verschiedenem Brechungexponenten sich zusammensetzen. Eine weitere Lichtzerstreuung muß notwendigerweise auch in den luftführenden Interzellularen stattfinden.

rom The Biodiversity Heritage Library http://www.biodiversitylibrary.org/; www.biol

Die im Text reproduzierten Photographien wurden von Herrn Dr. A. Jenčić, Assistenten am pflanzenphysiologischen Institut, aufgenommen. Bei den Versuchsanstellungen hatte ich mich mehrfach der Unterstützung des genannten Herrn, ferner des Herrn Dr. Karl Linsbauer, Adjunkten, und des Herrn Dr. Valerian Vouk, Demonstrators am pflanzenphysiologischen Institut, zu erfreuen. Den genannten Herren, desgleichen Herrn Dr. Wilhelm Schmidt, Adjunkten an der k. k. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, dessen Mithilfe ich im Text bereits namhaft gemacht habe, drücke ich auch an dieser Stelle meinen besten Dank aus.